

ЭЛЕМЕНТЫ МСТ И МИКРОСИСТЕМЫ

УДК 62-752.4:681.883

С. Ф. Петренко,

Украинский национальный технический университет, МНВП "Лилея"

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ БЕСКОНТАКТНЫЙ ПОДВЕС В СИСТЕМАХ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ

Представлены результаты разработки ультразвуковых бесконтактных подвесов с пьезоэлектрическим возбуждением и исследования возможности их использования в приборах ориентации и навигации — гироскопах, акселерометрах, гироскопах и т. д.

Приборы ориентации и навигации (гироскопы, акселерометры и т. д.) с бесконтактными подвесами (электростатическими, магнитными) по-прежнему занимают лидирующее положение как по точности, так и по габаритным размерам. Однако такие приборы не получили широкого распространения в коммерческой практике, что объясняется прежде всего технологическими трудностями при реализации таких подвесов и, как следствие, значительной стоимостью таких приборов.

Мы попытались построить альтернативный подвес на основе передовых оптических технологий с привлечением элементов функциональной твердотельной электроники. Наша цель состояла в разработке принципов построения дешевых ультразвуковых бесконтактных подвесов с пьезоэлектрическим возбуждением и в исследовании возможности использования таких подвесов в приборах ориентации и навигации.

Эффект ультразвукового взвешивания базировался на формировании ультразвуковой газовой микропленки толщиной ~ 1 мкм между сопрягаемыми поверхностями подвеса с помощью пьезоэлектрического резонатора. Конструкционный принцип построения ультразвукового подвеса с пьезоэлектрическим возбуждением основывался на возбуждении специальных вторичных колебаний подпятника при первичном возбуждении от пьезоэлемента [1, 2].

На рис. 1 (см. четвертую сторону обложки) представлены различные схемы опор, реализующие данный принцип. Они включают в себя кольцевой пьезорезонатор 1, поляризованный по нормали к плоскости пьезоэлемента, цапфу 2, подпятник 3. Пьезоэлемент закреплен на основании 4.

Основные технические характеристики экспериментальных опор представлены в таблице. Тип опор определялся габаритными размерами кольцевого пьезоэлемента, который фактически и определял диаметр опоры.

Параметр	Тип опоры		
	Трехступенная, $\varnothing 36$	Одноступенная, $\varnothing 46$	Трехступенная, $\varnothing 80$
Характер колебаний	Вторичные	Вторичные	Вторичные
Тип колебаний	Радиальный, 1-я мода	Радиальный, 1-я мода	Радиальный, 2-я мода
Частота колебаний	~ 50 кГц	~ 36 кГц	~ 40 кГц
Характер нагрузки	Осевой	Радиально-осевой	Осевой
Зазор	1...2 мкм	1...2 мкм	1...2 мкм
Осевое биение	—	$\sim 3...5''$	—
Угловой диапазон	$\pm 60^\circ$	$\pm 360^\circ$	$\pm 30^\circ$
Максимальная нагрузка	3 Н	4 Н (осевая) 1 Н (радиальная)	10 Н
Осевая жесткость	$0,3 \cdot 10^7$ Н/м	$0,4 \cdot 10^7$ Н/м	10^7 Н/м
Радиальная жесткость	—	$0,1 \cdot 10^7$ Н/м	—
Долговечность (оценка по комплектующим)	12 лет	12 лет	12 лет
Потребляемая мощность (при максимальной нагрузке)	3 Вт	6 Вт	10 Вт
Масса	0,04 кг	0,3 кг	0,2 кг
Рабочая среда	Воздух при нормальных условиях	Воздух при нормальных условиях	Воздух при нормальных условиях

Устройства на основе ультразвуковых бесконтактных подвесов

Рассмотрим схемы и элементы только тех устройств, которые были нами технологически проработаны и частично смакетированы и исследованы.

Двухкоординатный наклонмер. Основан на оптическом имитаторе плоскости горизонта, который взвешивается ультразвуковым подвесом. Основные характеристики оптического имитатора плоскости горизонта представлены ниже.

Точность воспроизводимости плоскости горизонта, "	3
Максимальный угол статического заклона основания, "	± 45
Время выхода на режим, с	0,1
Диаметр рабочей поверхности, мм	10
Потребляемая мощность, Вт	0,5
Масса, г	60

Гироскоп. Был выполнен макет гироскопа на ультразвуковых бесконтактных опорах. Двигатель был изготовлен с полым валом и предназначался также для размещения внутри него элементов модулятора или сканера. Это был тип самоцентрирующегося двигателя. Точность установки оси такого двигателя задавалась точностью установки ультразвуковых подпятников и в наших экспериментах составила $\sim 3^\circ$. Двигатель работал абсолютно бесшумно и без малейшего уровня детонации.

Выполненные эксперименты подтвердили технологическую возможность реализации такого двигателя не только для нужд гиротехнологий, но и для широкого использования в бытовой технике.

Гирокомпас. По аналогичной методике нами был изготовлен ультразвуковой подвес для гирокомпаса, схема которого представлена на рис. 2 (см. четвертую сторону обложки). Торсионный подвес в этой схеме был заменен ультразвуковым подвесом.

Точность была повышена почти в 2 раза, что, по нашему мнению, не является пределом. Основная проблема, которая возникает при этом, — балан-

сировка гирокомпаса относительно ультразвуковой опоры. Если в гироскопе она решалась на уровне цапфы, которая одновременно была и чувствительным элементом, то здесь балансировка уже охватывает как сам чувствительный элемент, так и его установку относительно цапфы, что требует дополнительной методической проработки.

Гироскоп. Был создан макет свободного гироскопа по аналогии с электростатическим гироскопом. Чувствительный элемент такого гироскопа был выполнен в форме цельного стеклянного шара (точностью ~ 1 мкм). Сфера взвешивалась с помощью двух ультразвуковых подвесов в форме шаровых поясов. Выполненные эксперименты подтвердили возможность реализации на данном принципе дешевого малогабаритного гироскопа по аналогии с электростатическим.

Выводы

На основании выполненной работы можно констатировать, что на сегодня практически предопределены технологические аспекты построения ультразвуковых бесконтактных опор с пьезоэлектрическим возбуждением.

Следующим этапом развития данного направления можно считать разработку конкретных ультразвуковых опор и систем применительно к устройствам различного класса. Наиболее явно здесь просматриваются гиротехнологии и приборы систем ориентации и навигации.

Список литературы

1. Петренко С. Ф., Ярошенко В. А. Спосіб формування газової опори прецизійного приладу і опора прецизійного приладу, яка його реалізує. Патент України № 4169, 1994.
2. Петренко С. Ф., Сидоренко Ю. З., Соловьев С. В. Опора прецизионного прибора. Патент СССР № 1782316, 1992.
3. Петренко С. Ф. Ультразвуковой бесконтактный подвес в системах ориентации и навигации // Материалы VII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам (29—31 мая, 2000 г., Санкт-Петербург). 2000. С. 113—115.

УДК 621.3.084.2:66.02

В. И. Казаков, Е. С. Горнев, д-р техн. наук,
В. А. Кальнов¹⁾, канд. техн. наук,
А. В. Волосов, канд. техн. наук,
В. К. Селецкий,
ОАО "НИИМЭ и завод "Микрон"¹⁾,
Физико-технологический институт РАН

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Рассмотрены особенности технологии изготовления двух типов микроакселерометрических датчиков с емкостным преобразованием. Выполнены исследования по технологии изготовления датчиков ускорения объемного типа с использованием элементов мембранной технологии и датчиков ускорения на основе пленочных поликремниевых структур и технологии микроэлектроники.

Введение

Современные системы наведения, навигации и управления требуют создания устройств для измерения линейных ускорений и угловых скоростей с малыми массогабаритными показателями и низкой стоимостью. Разработка таких систем основывается на успешном использовании микромеханических датчиков измерения линейных ускорений и угловых скоростей, выполненных с использованием технологии микроэлектроники [1, 2], которая обеспечивает высокую точность изготовления и низкую себестоимость продукции за счет групповой обработки пластин.

По сравнению с технологией микроэлектроники технология изготовления микромеханических датчиков имеет определенные особенности, связанные с получением чувствительных элементов:

- необходимы развитые методы анизотропного травления кремния;
- более высокие требования предъявляются к величине остаточных напряжений в используемых пленках и материалах;
- имеются технологические возможности создания трехмерной структуры и формирования подвижных элементов.

В последние годы получила развитие поверхностная микрообработка, когда подложка непосредственно не обрабатывается, а на нее селективно добавляются или удаляются с нее различные тонкопленочные материалы, к числу которых можно отнести поликристаллический кремний, диоксид кремния и др.

Важнейшей частью технологии микродатчиков является также создание удаляемых "жертвенных" слоев, например, с помощью химического травле-

ния. Такая технология позволяет создавать замкнутые пустоты, свободные для движения механических компонентов типа балок, роторов, пружин и т. п.

Технологические особенности формирования чувствительных элементов микроакселерометрических датчиков

Исследована технология изготовления акселерометрических датчиков объемного типа с применением элементов мембранной технологии на основе анизотропного травления кремния в щелочном растворе. В качестве маскирующего слоя использовался нитрид кремния. На рис. 1 приведен чертеж такого датчика. Подвижная чувствительная масса M , выполненная из фрагментов пластины монокристаллического кремния, вывешена на мембранных элементах толщиной от 5 до 30 мкм. Чувствительность датчика определяется как массой элемента M , так и упругостью мембранных подвесов. Мембранные подвесы формировались из монолитного кремния. Окончание процесса химического травления контролировалось по заданной глубине. Из-за недостаточной точности контроля возникает существенный разброс упругости мембранных подвесов, что сказывается на воспроизводимости параметров датчика.

Была опробована технология получения подвесов на основе поликремниевой пленки толщиной 5–10 мкм с разделительным слоем из нитрида кремния, которая обеспечивала заданную толщину

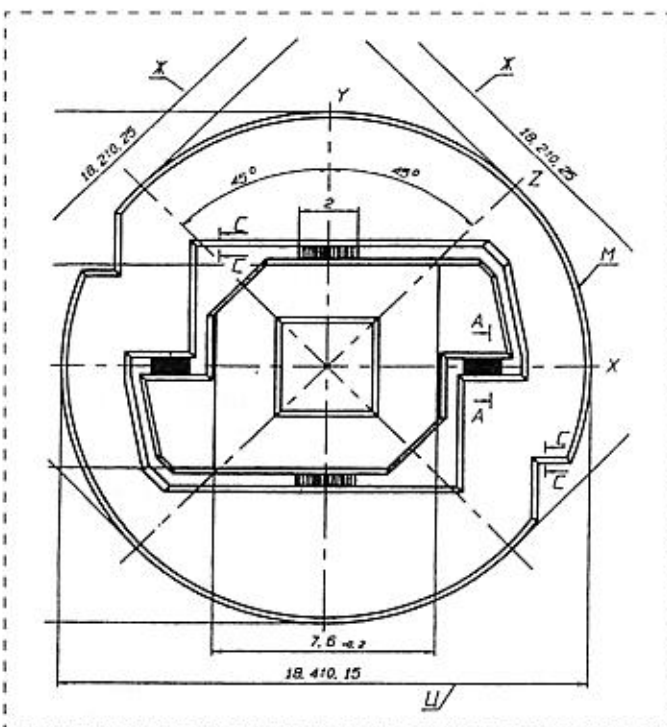


Рис. 1. Датчик объемного типа

подвеса и механические свойства для изготовления чувствительного элемента датчика объемного типа.

К технологическим особенностям изготовления чувствительного элемента датчика ускорений по технологии микроэлектроники нужно отнести:

- формирование пленки поликристаллического кремния с минимальными внутренними напряжениями, что исключает механическую деформацию консолей маятника и неподвижных консолей на всей площади датчика как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях;
- формирование топологического рисунка в поликремний с топологическими размерами на уровне 1 мкм и вертикальными боковыми стенками;
- при изготовлении чувствительного элемента датчика требуется разработка технологии травления "жертвенного слоя" для обеспечения конструкционной подвижности маятникового элемента.

Технологический маршрут изготовления датчика ускорений основан на операциях, используемых в КМОП-технологии, что позволяет в дальнейшем совместить технологию изготовления чувствительного элемента со схемой обработки сигнала в одном кристалле [3].

Технологический маршрут изготовления чувствительного элемента микросенсорного датчика ускорений представлен на рис. 2 (см. третью сторону обложки).

Первый этап технологии заключается в проведении процесса термического окисления кремния или пиролитического осаждения из газовой фазы диоксида кремния на подложку. Толщина оксида составляет 0,1–0,2 мкм.

Второй этап маршрута связан с формированием высоколегированного N^+ -слоя для создания проводников маятника, неподвижных консолей и проводящего слоя под всем чувствительным элементом датчика для уменьшения паразитной емкости. N^+ -слой формируется с использованием процессов фотолитографии, ионного легирования и соответствующего отжига. Процесс ионного легирования позволяет исключить появление дополнительного рельефа на поверхности диоксида кремния.

Третий этап маршрута обеспечивает создание требуемой толщины жертвенного слоя с помощью осаждения дополнительного слоя диоксида кремния. Общая толщина диоксида кремния может находиться в пределах 1–2 мкм.

Этап формирования контактных областей осуществляется с помощью стандартного процесса фотолитографии и травления диоксида кремния. На этом этапе следует обратить внимание на формирование боковой границы контактных окон. Угол наклона боковой поверхности желательно иметь в пределах 70–80° для обеспечения конформного осаждения поликремния в контактные

области для обеспечения соответствующей жесткости конструкции и высокой надежности работы всего датчика.

Для формирования пленок диоксида и нитрида кремния, а также поликремния применялись стандартные процессы пиролитического осаждения с использованием моносилана и соответствующих газовых добавок на установке "Изотрон 2" при температуре 500–600 °С и давлении 50–150 Па.

Травление диоксида кремния и поликремния проводилось с помощью ионно-химического травления на установке ПХТ100-008. Использование этого метода травления обеспечивает селективность процесса травления и точное воспроизведение размеров топологии.

Исследованиям свойств поликристаллического кремния (Si^*) посвящено достаточно большое число публикаций. Это объясняется тем, что существует много способов его получения, которые, в свою очередь, определяют свойства полученных слоев, а именно, проводимость, размеры зерна, текстуру, оптические свойства, внутренние напряжения, воспроизводимость при данном способе получения и т. д.

Сравнительно новая область использования Si^* — микромеханические устройства. Определяющим фактором при изготовлении этих устройств является получение минимальных внутренних напряжений, от которых зависят основные характеристики устройства: прямолинейность консольных элементов и жесткость пружинных подвесов.

Ряд опубликованных работ [4, 5, 6] посвящены исследованию структуры Si^* . В этих работах рассмотрено влияние технологических факторов, влияющих на размер зерен и их преимущественную ориентацию. Показано, что микроструктура Si^* определяется в основном условиями выращивания: температурой, временем роста, скоростью осаждения, степенью легирования и в меньшей степени — ориентацией исходной подложки. При этом текстура слоя может быть от произвольной до преимущественной в плоскостях {110}, {100}, {111}.

Нами проведены исследования внутренних механических напряжений в зависимости от изменения технологии формирования поликремниевых пленок. Напряжения в пленках определялись по измеренным радиусам изгибов R кремниевых пластин. При малых значениях ($R < 1$ м), как правило, применяют методику определения брэгговских углов дифракции двух линий $K_{\alpha 1}$ и $K_{\alpha 2}$ на двухкристалльном рентгеновском дифрактометре. При больших значениях R целесообразно использовать механизм линейного сканирования пластины относительно падающего рентгеновского пучка. При определении точного угла Брэгга для двух точек на образце, расстояние между которыми составляет

1 см, точность должна быть не хуже 0,1". В настоящем анализе мы использовали вторую методику. Измерения проводились на (004)-отражении с применением $\text{CuK}_{\alpha 1}$ -излучения в симметричной схеме дифракции. Измеряли разницу углов дифракции в двух точках, отстоящих на расстоянии 1 см. Это позволяет определять изменения длин линий l между двумя выбранными точками на обеих поверхностях кристаллической пластины:

$$\Delta l = l \Delta \Theta,$$

где l — толщина пластины; $\Delta \Theta$ — экспериментальное значение разницы углов дифракции.

В свою очередь, величина

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{\epsilon}{R} = \frac{T}{E}$$

связана с деформацией кристаллической решетки ϵ и модулем Юнга E . Расчеты проводились по формуле

$$T = \frac{E \epsilon}{R} \nu,$$

где $\nu = 0,23$ — число Пуассона.

Методом изгиба находится тангенциальная составляющая деформации. Нормальную составляющую целесообразно определять по изменению периода элементарной ячейки кристалла. Результаты измерений представлены в таблице.

При решении задачи разработки технологии изготовления датчика требуется технологическая

Изменение напряжений в пластинах после нанесения на поверхность поликристаллического кремния, ионно-легированного атомами фосфора, и термического отжига

№ образца	Азимутальный угол, °	Радиус кривизны, м, центр	Радиус кривизны, м, край	Напряжение $T \cdot 10$, Н/см ² , центр	Напряжение $T \cdot 10$, Н/см ² , край
5	0	172 воги.	258 вып.	+0,6	-0,4
	90		79 вып.		-1,29
	180		52 вып.		-1,96
	270		115 воги.		+0,86
4	0	343 воги.	64 вып.	+0,3	-1,6
	90		64 вып.		+1,6
	180		61 вып.		-1,67
	270		69 вып.		-1,48
3	0	147 воги.	103 вып.	+0,7	-0,99
	90		49 воги.		+2,08
	180		69 воги.		+1,48
	270		61 вып.		-1,67

операция удаления "жертвенного" слоя, например, диоксида кремния толщиной 1—1,5 мкм под слоем поликремния. В этом случае требуется решение задачи получения наибольшего подтрав материала в целях освобождения подвижных элементов датчика от подложки. Решение этой задачи связано с выбором соответствующего травителя, разработкой технологического процесса, разработкой топологии. Топологические элементы поликристаллического кремния проектируются с учетом горизонтального травления диоксида кремния.

Существующие технологические приемы изготовления подвижных микромеханических структур основаны главным образом на травлении "жертвенного" слоя. Применяемый технологический прием является предметом широких исследований в области выбора метода травления, состава химических реагентов в целях обеспечения изотропного травления "жертвенного" слоя, например диоксида кремния, на ширину, много большую, чем ширина маски для полного разделения поликремниевых балок от поверхности подложки (рис. 3, см. третью сторону обложки).

Если рассматривать химические реакции взаимодействия диоксида кремния с плавиковой кислотой, то можно записать:



Соединение SiF_4 само по себе довольно устойчиво, однако под действием воды при нормальной температуре разлагается, что объясняется большим сродством кремния к кислороду:



Разложение фторида кремния, как видно из реакции, сопровождается образованием SiO_2 , которое может выделяться в виде геля кремниевой кислоты и трудно растворимо в воде.

Одновременно может происходить взаимодействие выделяющегося HF с неразложившимся фторидом кремния до образования кремнийфтористоводородной кислоты H_2SiF_6 :



Практически в водных растворах или средах кремнийфтористоводородная кислота образуется по реакции



При этом кислота может находиться в виде гидрата $\text{H}_2\text{SiF}_6 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, который представляет собой бесцветные твердые кристаллы с температурой плавления 19 °С.

На практике образование инородных слоев в виде геля SiO_2 и кристаллогидрата H_2SiF_6 снижает

скорость травления диоксида кремния, что особенно заметно при изотропном травлении через маску поликремния.

Эти рассуждения можно отнести и к способу травления в парах раствора плавиковой кислоты и воды, который мы использовали при получении первых образцов чувствительных элементов микродатчиков ускорений.

Для проведения этих исследований был сконструирован и изготовлен макет лабораторной установки для травления "жертвенного" слоя диоксида кремния в парах $\text{HF} + \text{H}_2\text{O}$. Экспериментальная установка обеспечивает поддержание температурного режима травимой подложки и водного раствора плавиковой кислоты. Эффективное травление диоксида кремния было получено при разности температур $\Delta T = 9 \div 11^\circ\text{C}$ и составляла $5\text{--}10\text{ мкм/ч}$ по горизонтальному размеру. При увеличении разности температуры до $\Delta T = 12^\circ\text{C}$ скорость травления диоксида кремния резко падала за счет недостаточной адсорбции на поверхность пластин HF и десорбции продуктов реакции.

Такое малое значение разности температур приводило к локальным образованиям на поверхности подложки геля кремниевой кислоты и кристаллогидрата H_2SiF_6 , что не обеспечивало полного отрыва поликремниевых элементов от подложки.

Различные виды плазменной обработки пластин после травления несколько улучшали ситуацию, но процент выхода годных приборов оставался низким.

Для травления "жертвенного" слоя наиболее привлекательным является способ жидкостного химического травления диоксида с использованием сформированных с помощью фотолитографии поддержек из фоторезиста. Этот процесс стыкуется с общепринятой технологией изготовления интегральных схем.

Метод заключается в плазмохимическом травлении SiO_2 через сформированную маску из поликремния (рис. 4, а, см. третью сторону обложки) и формирования из фоторезиста поддержек с помощью дополнительного процесса фотолитографии (рис. 4, б, см. третью сторону обложки).

Для проверки этого процесса был спроектирован и изготовлен комплект фотошаблонов, проведена партия пластин по технологическому маршруту, выполнено плазменное травление SiO_2 через маску сформированного рисунка поликремниевых элементов и осуществлено жидкостное химическое травление SiO_2 .

Для формирования поддержек проведена корректировка стандартного маршрута фотолитографии для процесса нанесения слоя фоторезиста определенной толщины, процесса экспонирования и проявления фоторезиста в целях формирования

рисунка по рельефной топологии (высота рельефа в пределах $2\text{--}3\text{ мкм}$). Ширина поддержек составила 4 мкм , расстояние между поддержками 20 мкм . Травление слоя SiO_2 проводилось в водном растворе плавиковой кислоты за время $10\text{--}15$ мин с последующей промывкой пластин в деионизованной воде. Фоторезист удалялся в кислородной плазме в стандартном режиме. В результате были получены образцы тестовых кристаллов чувствительных элементов (рис. 5, см. третью сторону обложки).

Выводы

Проведен анализ технологических подходов изготовления микроакселерометрического датчика с использованием анизотропного травления кремния и технологии микроэлектроники. Обращено внимание на два основных технологических момента — получение пленок поликристаллического кремния с минимальными механическими напряжениями и заданной толщиной, а также технологии селективного травления жертвенного слоя для создания подвесных элементов.

Разработан технологический маршрут, отработаны основные технологические операции для изготовления датчика: нанесение диоксида кремния заданной толщины, травление контактных окон, осаждение и легирование поликристаллического кремния, травление поликремния и химическое удаление "жертвенного" слоя.

Подготовлена и опробована методика измерения внутренних механических напряжений в поликремнии на основе рентгеновской дифракции. Проведенные исследования показали, что при существующей технологии формирования поликремния внутренние напряжения пленки поликремния находятся в пределах $5\text{--}7\text{ Н/см}^2$, что удовлетворяет требованиям изготовления консольных элементов датчика ускорений.

Выполнены тестовые образцы кристаллов по технологии анизотропного травления кремния и технологии микроэлектроники.

Список литературы

1. Vintro L. C. Can micromachining deliver? // Solid State technology. 1995. Vol. 38. N 4. P. 57—58.
2. Zinner H. Microsystems the European approach // Sensors and Actuators A. 1995. Vol. 46. N 1—3. P. 1—3.
3. Kitchin C. Micromachined complete-on-a-chip sensor measures 5-g accelerations // Analog Dialogue. 1995. Vol. 29. N 1. P. 10.
4. Fripp A. L., Stermer R. L. Structure of silicon films deposited on oxidized silicon wafers // Electrochem. Soc., 1970. Vol. 117. N 12. P. 1569—1571.
5. Kamins T. I., Gass T. R. Structure of chemically deposited polycrystalline silicon films // Thin Solid Films. 1973. Vol. 16. N 2. P. 147—165.
6. Rai-Chondhury P., Hower P. L. Growth and characterization of polycrystalline silicon // Electrochem. Soc., 1973. N 120. P. 1761—1766.

ПРИМЕНЕНИЕ МСТ

УДК 621.38:004.312.46

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф.,
К. М. Пономарев, канд. техн. наук,
В. О. Толчеев*, канд. техн. наук, доц.,
В. М. Чистяков, канд. техн. наук,
Секция прикладных проблем РАН
* Московский энергетический институт
(технический университет)

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МИКРОРОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ АГЕНТЫ И МНОГОАГЕНТНЫЕ МИКРОСИСТЕМЫ

Описан новый подход построения робототехнических систем, основанный на использовании интеллектуальных робототехнических агентов. Представлены последние разработки в области создания таких агентов, рассмотрены принципы объединения интеллектуальных робототехнических агентов в единую многоагентную систему, показаны основные области использования подобных систем. Проанализированы перспективы совместного применения интеллектуальных робототехнических и программных агентов при объединении их в многофункциональную интеллектуальную информационную систему.

В последнее десятилетие в рамках работ в области распределенных систем искусственного интеллекта (Distributed Artificial Intelligence Systems) и "искусственной жизни" (Artificial Life)¹ сформировалось новое направление по использованию автономных программных и робототехнических интеллектуальных агентов для создания систем самого широкого назначения [1]. Произошедший в конце 80-х — начале 90-х годов прорыв в таких областях, как компьютерные и сетевые технологии, микроэлектроника и микромеханика, привел к тому, что технология интеллектуальных агентов из перспективного теоретического направления превратилась в технологию, которая в последние десятилетия все в большей степени претендует на роль ведущей

технологии в робототехнике, информатике, телекоммуникации, электронной коммерции, распределенных системах управления, дистанционном обучении, защите информации и т. д. [2, 3].

Необходимо отметить, что к настоящему времени не существует общепризнанного определения интеллектуального агента, что позволяет относить к данному классу достаточно разнотипные программы и устройства. Тем не менее, на наш взгляд, будет корректно следующее определение. Автономным интеллектуальным агентом (autonomous intelligent agent) называется программный или технический объект, выполняющий поставленную задачу в некоторой среде, обладающий способностью планировать и принимать самостоятельные решения, обмениваться информацией с другими интеллектуальными агентами.

Множество интеллектуальных агентов, способных к коллективному функционированию для решения поставленной задачи (иерархическому подчинению, разделению обязанностей, кооперации, синхронизации своих действий) и имеющих механизмы разрешения межагентных конфликтов, представляет многоагентную систему.

Многие специалисты придерживаются мнения, что понятие "агент" — это лишь красивая метафора (как и многие другие термины в области систем искусственного интеллекта), за которой скрывается вполне конкретное понятие — программа или устройство. Однако большинство специалистов ссылаются на определение термина "агент" в словаре Вебстера — "лицо или фирма, облеченные полномочиями действовать за другого". На наш взгляд, это определение вполне отражает назначение и обязанности, выполняемые робототехническими и программными агентами, которые уполномочены действовать "за другого" — эксперта или лицо, принимающее решение [4].

Среда, в которой действуют автономные интеллектуальные агенты, может быть различной. В случае, когда такой средой является киберпространство, под автономными агентами понимаются программные интеллектуальные агенты (software intelligent agents) — программы, реализующие функции поиска, сбора и преобразования информации преимущественно в сетевой среде. В соответствии с классификацией программных интеллектуальных агентов на основе целей и задач, которые они выполняют, различают информационные и мобильные агенты (information and mobile agents), агенты-переговорщики и агенты-ассистенты пользователя (collaborative, interface agents) и т. д. [1].

¹Искусственная жизнь — это обширное междисциплинарное научно-техническое направление, в основе которого лежат моделирование и имитация живых систем. В отличие от биологии, которая изучает общие принципы функционирования живых организмов, законы их развития, жизнедеятельности и воспроизводства (life-as-we-know-it), специалисты в области "искусственной жизни" на основе имеющихся знаний в научной и инженерной областях создают устройства, материалы, компьютерные программы, обладающие желаемыми, заранее заданными свойствами (life-as-it-could-be), т. е. "искусственная жизнь" — это то, что создает человек на основе знаний о том, что и как создала природа.

Когда упомянутой средой является реальный мир, под автономными агентами понимаются *робототехнические интеллектуальные агенты* (robotic intelligent agents) — роботы, способные автономно функционировать в реальной среде (решать задачи выживания, перемещения, навигации, энергообеспечения и т. п.) в целях регистрации требуемых физико-химических параметров объектов окружающего мира, передачи полученной информации ее потребителю, осуществления спланированных действий.

В последующем тексте термины автономный и интеллектуальный применительно к робототехническим агентам будут опускаться для краткости изложения, при этом понятия робототехнический агент и микроробот будут использоваться как синонимы.

Таким образом, робототехнический агент представляет собой автономную интеллектуальную систему, состоящую из следующих мехатронных компонентов [3]:

- двигательной системы ("тела");
- сенсорной системы ("органов чувств");
- системы управления ("мозга");
- системы коммуникации ("языков и каналов связи").

Существует несколько общих подходов для построения робототехнических агентов.

Подход на основе символической модели мира, в которой решения принимаются путем логических рассуждений (так называемая *делиберативная архитектура* {*deliberative architecture*}). Такие агенты называются агентами, основанными на знаниях. Для представления знаний используются хорошо известные в системах искусственного интеллекта методы — *логический, продукционный, семантический, фреймовый*.

Альтернативный подход основывается на том, что интеллектуальное поведение может быть обеспечено без использования символической модели мира, путем формирования реакций агента на события внешнего мира. Такой подход был предложен Р. Бруксом (R. Brooks) в 1985 г. в процессе работы над созданием автономных мобильных роботов и получил название *реактивной архитектуры* {*reactive architecture*}² [5]. При построении интеллектуального агента с реактивной архитектурой предполагается, что большинство его действий могут рассматриваться как рутинные, т. е. после обучения интеллектуальный агент выполняет их с минимальными изменениями. Типичными представителями, реализующими данный подход, являются нейросетевые интеллектуальные агенты.

В настоящее время для создания наиболее эффективно функционирующих агентов, решающих слабоформализуемые задачи, применяется *гибридная архитектура*, объединяющая преимущества как делиберативной, так и реактивной архитектур.

На первый взгляд, работы по созданию робототехнических агентов все еще находятся в некоторой тени ажиотажа вокруг разработки и использования программных агентов, которые уже стали одним из основополагающих инструментов создания информационно-поисковых систем, распределенных систем управления и обучения, систем электронной коммерции. Однако более внимательный анализ публикаций в области создания робототехнических агентов позволяет сделать вывод о том, что разработчики уже реализовали различные теоретические концепции в виде опытных образцов и приступили к непосредственному их испытанию. По результатам этих испытаний ожидается широко-масштабное внедрение и эксплуатация робототехнических агентов и многоагентных систем для решения реальных задач. По прогнозам американских специалистов, уже к 2010 г. первые автономные микророботы будут реализованы в виде коммерческих продуктов и заменят человека там, где работа или опасна для здоровья, или человек не может ее осуществлять по каким-либо причинам [6].

На наш взгляд, интересным представляется обзор уже достигнутых результатов в области создания робототехнических агентов.

Японские ученые сконструировали робота длиной 1 см и массой 0,5 г. Он предназначен для обслуживания АЭС и ТЭС и восстановления поврежденных участков электростанций. Робот способен проникать в поврежденные зоны, проползать по тончайшим трубкам и осуществлять ремонтные работы [7].

В начале 1999 г. исследователи Калифорнийского университета (г. Беркли) выполнили по программе "Умная пыль" (Smart Dust) функционально сложный датчик в виде таблетки диаметром около 5 мм. Помимо чувствительного элемента этот датчик содержит аналого-цифровой преобразователь, процессор, запоминающее устройство совместно с устройством оптической дуплексной внешней связи и источником возобновляемой энергии [8]. В 2001 г. планируется уменьшить габаритные размеры этого датчика до 1–2 мм. Подобные устройства будут использоваться для создания распределенной многоагентной робототехнической системы, которая может применяться в военных, разведывательных целях, а также для мониторинга загрязнения окружающей среды, навигации и т. п.

Одна из последних выставок роботов "Robodex-2000" в г. Иокогаме выявила особый интерес со стороны медицинских учреждений в использовании робототехнических агентов для решения своих задач. Так, по прогнозам специалистов доля только кардиологических операций, выполняемых микророботами, возрастет с 5 % в 1999 г. до 30 % в 2005 г. [9]. При этом роботы позволят проводить подобные операции без вскрытия грудной клетки и использования аппаратов искусственного кровообращения, т. е. намного быстрее и с меньшим риском для пациента. Единственным ограничением

²Брукс назвал данную архитектуру subsumption architecture.

для широкого применения микророботов в медицине остается их стоимость — около 1 млн. долл.

Одним из основных направлений в разработке робототехнических агентов является создание наземных, плавающих, летающих и низкоорбитальных космических мини- и микророботов. Среди известных результатов, отражающих современный уровень развития таких робототехнических агентов, необходимо отметить следующие.

- ♦ Плавающий миниробот размером с небольшую рыбу (1,3 м в длину) был разработан в Массачусетском технологическом институте [10]. В настоящее время исследователи ведут работы по созданию многоагентной системы, имитирующей движение и маневренность стаи рыб. В США на основе технологии uFLEX фирмы RWI Division был создан шагающий робот Ariel для подводного разминирования [7].
- ♦ В университете им. Вандербильта создан наземный микроробот, оснащенный телекамерой, микрофоном, датчиками для обнаружения в воздухе химических и биологических компонентов. Длина корпуса миниробота составляет около 5 см, а движения несущей платформы копируют движения саламандры. Национальное агентство по авиационным и космическим исследованиям (НАСА) разработало несколько различных модификаций роботов, в частности, робот "Snakebot" [11], имеющий форму змеи и имитирующий ее движение; робот "K9" [12], выполненный в виде небольшой собаки. Оба робота сейчас проходят тестовые испытания и предназначены для передвижения и осуществления действий в условиях местности со сложным рельефом. НАСА также возглавляет консорциум, разрабатывающий миниатюрный робот — микровездеход — длиной менее 40 см, который сможет действовать в условиях "неструктурированной" местности. Это устройство будет настолько мало, что его сможет переносить и использовать один человек, при этом данный робот будет достаточно прочным, чтобы выдерживать различные удары (например, в случае перебрасывания через забор или при столкновении с каким-либо препятствием). В конструкции робота были использованы технологии, которые НАСА разработало по программе исследования космического пространства (в частности, для взятия проб с поверхности Марса) [13].
- ♦ Многие разрабатываемые в США летающие мини- и микророботы представлены аппаратами с фиксированным крылом. Размах крыла этих аппаратов не превышает 20 см, радиус действия составляет от 30 до 60 км. Себестоимость производства таких летательных аппаратов оценивается предположительно в 1 тыс. долл. за экземпляр. К данному классу микророботов следует отнести аппарат "MicroStar" концерна

Lockheed Martin, а также аппарат "Black Widow" фирмы AeroVironment. В настоящее время проводятся испытательные полеты этих аппаратов, однако нерешенными проблемами пока еще остаются разработка мощного и легкого двигателя и осуществление посадки робота-самолета [7].

Другое направление работ по созданию летающих минироботов представлено аппаратами, имеющими машущие крылья и предназначенными для выполнения различных задач на малых скоростях полета (например, в случае ограниченного воздушного пространства в условиях города). К таким аппаратам относятся энтомоптер Технологического исследовательского института штата Джорджия и орнитоптер фирмы SRI International.

Интересным также представляется разработка робототехнических агентов в виде вертолетов. Так, в 1999 г. Стенфордский университет сообщил о создании им вертолета, длина корпуса которого составляет около 15 мм. Вертолет снабжен четырьмя несущими винтами, каждый из которых имеет индивидуальный электропривод.

- ♦ Параллельно с разработкой летающих мини- и микророботов в США осуществляется программа по разработке низкоорбитальных минироботов массой не более нескольких сот граммов. Вывод на орбиту этих минироботов может осуществляться с мобильных платформ легкими и сверхлегкими ракетными носителями, а расходы многократно сократятся относительно необходимых в настоящее время. Себестоимость производства таких микророботов не превысит, как ожидается, нескольких тысяч долларов за экземпляр.

Анализируя возможные пути дальнейшего развития робототехнических агентов, необходимо отметить, что они во многом определяются потребностями военного ведомства США. Так, Управление перспективных исследований и разработок министерства обороны США (ДАРПА), которому принадлежит особая роль в координации и финансовой поддержке развития передовых технологий, уделяет особое внимание развитию робототехнических агентов. В настоящее время можно выделить два основных направления исследований [6, 14].

1. *Совершенствование микроэлектромеханической части робототехнического агента.* Для этого наиболее перспективным представляется использование достижений нанотехнологии и биотехнологии для разработки новых видов робототехнических агентов и "гибридных" (комбинированных) агентов³ [14]. В перспективе, учитывая значительные успехи в области синтеза органических и неорганических веществ, конструирования белков (protein design), создания принципиально новых

³Согласно классификации, предложенной в [1], такие агенты называются *биологическими агентами*. Однако под биологическими агентами традиционно также понимаются компоненты биологического оружия, поэтому во избежание путаницы в данной статье используется название "гибридные" (комбинированные) агенты.

биомолекулярных материалов, можно предположить возможность использования в качестве "гибридного агента" клеток животных, бактерий, специально созданных вирусов, фрагментов ДНК. Уже сейчас ведется разработка таких агентов в качестве компонентов сложных технических устройств (в частности, ДАРПА осуществляет программу по молекулярной электронике — *Moletronics* [15])⁴. Возможно также использование живых организмов (пчел, мотыльков, тараканов), оснащенных дополнительными сенсорными, управляющими, радиопередающими и навигационными устройствами, в качестве "гибридных агентов" [16].

2. *Разработка программных средств и протоколов обмена данными для объединения различных робототехнических агентов в единую многоагентную систему.* Так, в рамках нескольких программ, финансируемых ДАРПА — "Боевая система будущего" (*Future Combat System*) и "Распределенные робототехнические системы" (*Distributed Robotics*), решается задача объединения нескольких автономных робототехнических агентов в единую систему обмена информацией, выработки целеуказаний, иерархического подчинения. Основным назначением таких агентов является наблюдение за полем боя, видовая, метеоро- и радиоразведка, постановка помех, а также нанесение ударов по позициям противника. При этом роботы или мехатронные машины рассматриваются как интеллектуальные агенты, имеющие собственные базы данных и знаний, механизмы принятия решений, сенсорные устройства, каналы связи для обмена информацией между собой в процессе решения общей задачи (например, задачи навигации в заранее неизвестной среде с препятствиями). Интеллектуальные системы управления и принятия решений каждого агента могут решать только свои локальные задачи в области "ответственности", не обладая достаточными энергетическими ресурсами и знаниями для решения всей задачи в целом. Поэтому необходимо объединять таких робототехнических агентов в многоагентную систему.

Для разработки протоколов связи между робототехническими агентами применяются те же подходы, которые широко используются при разработке многоагентных систем, состоящих из программных агентов. К числу таких эффективных программных средств относятся *Java*, *Corba* (*Common Object Request Broker Architecture*), модифицированные диалекты языков программирования *Лисп* и *Пролог*, а также протокол взаимодействия интеллектуальных агентов — *KQML* (*Knowledge Query and Manipulation Language*)⁵ [1].

⁴ В англоязычной литературе такие элементы сложных технических систем, используемых для измерения, контроля и управления различными физическими величинами, часто называются *smart matter* — "интеллектуальное вещество".

Таким образом, зарождается новая парадигма в области систем искусственного интеллекта — интеграция различных видов агентов (программных, робототехнических, "гибридных") в единую интеллектуальную информационную инфраструктуру получения, обработки, анализа и хранения информации. В данной инфраструктуре робототехнические и "гибридные" агенты будут ответственны за добычу, передачу информации и осуществление определенных действий, направленных на достижение поставленных целей, согласованных с другими агентами, а программные агенты будут осуществлять многофункциональный анализ информации, поступающей из различных источников, и принимать решение о стратегии дальнейших действий. При этом программные агенты могут также обеспечивать безопасность сети, в которой происходит обработка информации, и обеспечивать интеллектуальное взаимодействие с пользователем. Алгоритмы управления и принятия решений, протоколы обмена информацией, навигация для различных видов агентов практически идентичны, что упрощает разработку и использование таких многоагентных систем. В этой связи нельзя не согласиться с мнением видных американских специалистов, которые утверждают, что, если 90-е годы были эрой персональных компьютеров и Internet, то первое десятилетие XXI века будет эрой роботов [7, 9]. Конкретизируя данную мысль, можно добавить, что это будет десятилетие интеллектуальных агентов, прежде всего робототехнических и программных.

Список литературы

1. *Software Agents*. Ed. Bradshaw J., AAAI Press / The MIT Press, 1997. P. 10–292, 294, 308–313, 368, 378, 434.
2. Городецкий В. И. Многоагентные системы: современное состояние исследований и перспективы // *Новости искусственного интеллекта*. 1996. № 1. С. 1–8.
3. Тимофеев А. В. Мультиагентное и интеллектуальное управление сложными робототехническими системами // *Теоретические основы и прикладные задачи интеллектуальных информационных технологий*. СПб.: СПИИ РАН, 1999. С. 71–81.
4. Трахтенгерц Э. А. Взаимодействие агентов в многоагентных системах // *Автоматика и телемеханика*. 1998. № 8. С. 3–52.
5. Brooks R. A. Intelligence without representation // *Artificial Intelligence*. 1991. Vol. 147. P. 139–159.
6. Kenyon H. S. Development program etches future for mobile robots // *Signal*, February 2000. P. 23–26.
7. Боровский С. Досье искусственного интеллекта // *PC Week/RE*. 1999. № 43. С. 33.
8. СНПР. Январь 2001. С. 12.
9. Коллоли П. Роботы уменьшают риск хирургических операций // *ComputerWorld* (Россия). 26 декабря, 2000. С. 36.
10. Taubes G. Biologist and engineers create a new generation of robots that imitate life // *Science*. 7 April. 2000. P. 80–83.
11. *New Technology Week*. Monday, October 16, 2000. P. 9.
12. <http://www.robotica.pagina.nl>.
13. *Jane's International Defense Review*. 1999. N 7. P. 11.
14. *New Technology Week*. Monday, July 3, 2000. P. 5, 12.
15. *Jane's International Defense Review*. 1998. N 10. P. 35.
16. Рубцов И. В., Нестеров В. Е., Рубцов В. И. Современная зарубежная военная микро- и мини-робототехника // *Микро-системная техника*. 2000. № 3. С. 36–42.

⁵ Протокол KQML (*Knowledge Query and Manipulation Language*) был разработан в 1994 г. при поддержке ДАРПА для интеллектуальной системы управления, сбора информации и связи между мобильными транспортными средствами.

УДК 621.38

И. Н. Ескин, В. Б. Шаров, Е. П. Шешин, д-р физ.-мат. наук, проф., МФТИ,

А. А. Шука, д-р техн. наук, МИРЭА

ОСОБЕННОСТИ ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИОДНЫХ СТРУКТУР С АВТОКАТОДАМИ ИЗ ПАН-ВОЛОКОН

Рассмотрены матричные автоэмиссионные катоды из углеродного волокна. Описана схема экспериментального прибора триодной конструкции. Приведены автоэмиссионные характеристики катодов. Получена эмпирическая формула для анодно-сетчатых характеристик автоэмиссионного матричного триода. Показано, что вклад отдельных эмиттеров в токоотбор является одинаковым с точностью до $4U/I$ в широком диапазоне токов вплоть до 5 мА.

1. Введение

Автоэлектронные катоды различных типов длительное время служат объектом исследования в качестве перспективных источников электронов для электровакуумных приборов, что обуславливается такими преимуществами автоэмиссии, как, например, отсутствие потерь мощности на подогрев катода, экспоненциально высокий рост силы тока от напряжения, мгновенная готовность катода к работе [1]. Однако, несмотря на высокие локальные плотности тока, токоотбор с одиночных катодов относительно мал — в стационарном состоянии не превышает уровня в несколько сотен микроампер для традиционных металлических острий [2]. Повышение эмиссионного тока может быть достигнуто созданием систем с большим числом эмиттеров, однако большинство существующих многоэмиттерных массивов (многоигольчатых на основе металлических и полупроводниковых острий, эвтектических соединений с нитевидными включениями и др.) не обеспечивают равномерности токоотбора от эмиттера к эмиттеру, что ограничивает суммарный ток [3]. Использование сложной интегральной технологии в матрице Спиндта [4] позволило достичь одинаковой формы для нескольких тысяч микроострий, так что их суммар-

ный вклад в общий ток пропорционален числу эмиттеров, однако работоспособность данной системы сохраняется лишь в сверхвысоком вакууме при давлениях не хуже 10^{-9} мм рт. ст.* В то же время для большинства электровакуумных приборов требуется работоспособность при давлениях на уровне 10^{-6} — 10^{-7} мм рт. ст.

Разработанные в последнее время технологические принципы построения токовой обработки автокатодов из полиакрилонитрильных (ПАН) углеродных волокон [5] позволяют создавать автокатоды, способные устойчиво функционировать в вакууме 10^{-6} — 10^{-7} мм рт. ст. в течение длительного времени [6].

Последнее обстоятельство открывает возможность создания многоэмиттерных катодов на основе углеродных волокон и разработки приборов с использованием таких катодов. Настоящая статья посвящена исследованию эмиссионных характеристик триода на основе макета многоэмиттерного автокатада из ПАН углеродных волокон.

2. Методика эксперимента

Основные эксперименты по исследованию автоэмиссионных характеристик триодов с автока-

тодом из ПАН волокон проводились на отпаянных приборах.

Схема экспериментального триода представлена на рис. 1. В качестве источника эмиссии использовались матричные автокатоды 2 с десятью изолированными эмиттерами из пучков ПАН углеродных волокон 3 (с температурой термической обработки 1950°C) общим диаметром 70 мкм, предварительно упрочненных пироуглеродом и покрытых с помощью химического и электролитического осаждения слоем никеля толщиной 2—70 мкм. Пучки располагались на основании 2 по окружности с шагом 1,2 мм, основание закреплялось на ножке прибора 1, при этом все эмиттеры имели независимые входы электрического питания.

После установки эмиттеры выравнивались по высоте с помощью электроэрозионной резки, затем подвергались индивидуальной токовой формовке, описанной в [7].

В качестве управляющего электрода 4 использовалась вольфрамовая сетка с размером ячеек 50×50 мкм, расстояние l от плоскости сетки до вершин эмиттеров составляло 0,1—0,4 мм. Анод 5 представлял собой диск из никелевой фольги толщиной 0,8 мм и диаметром 20 мм, расстояние d от

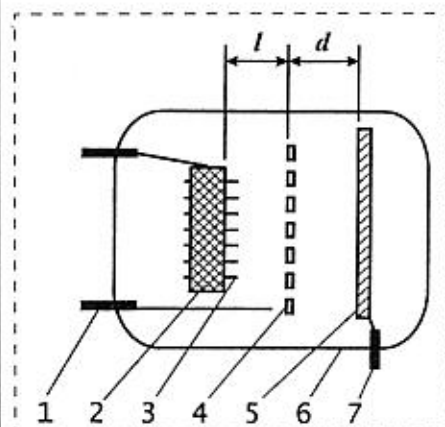


Рис. 1. Конструкция экспериментального прибора:

1 — ножка; 2 — матричный автокатод; 3 — пучок ПАН волокон; 4 — управляющий электрод-сетка; 5 — анод; 6 — корпус прибора; 7 — вывод анода

*1 мм рт. ст. = 133,322 Па.

вытягивающего электрода до анода варьировалось от 20 до 80 мм в различных приборах.

Макеты триодов собирались в стеклянных корпусах и спаивались на посту с безмасляной откачкой при вакууме 10^{-6} – 10^{-7} мм рт. ст.

Формовка углеродно-волоконных эмиттеров и снятие вольт-амперных характеристик проводились в автоматическом режиме с использованием вычислительно-управляющего комплекса.

Для получения ускоряющих анодных напряжений служил высоковольтный источник с ручным управлением и выходным напряжением ± 15 кВ ± 10 В. Сила сеточного и анодного токов измерялась стрелочным микроамперметром М2015 с погрешностью 0,5 %.

В ходе экспериментов было установлено, что в диодной конструкции при расстоянии до дискового анода 0,4 мм все эмиттеры после формовки обеспечивают близость характеристик при одинаковых напряжениях, причем разброс силы токов между эмиттерами составляет 10–15 % на уровне $5 \cdot 10^{-3}$ А и не превосходит 25 % на уровне $5 \cdot 10^{-9}$ А.

3. Результаты экспериментов

На рис. 2 представлены характеристики триода с матричным автокатодом, в котором сетка и анод находятся под общим потенциалом. Сплошные кривые на графике соответствуют катодному току, регистрируемому ЭВМ, штриховые — сеточному току.

Разброс силы токов эмиттеров в триодной конструкции несколько выше — до 40 % в широком диапазоне (кривые 1, 2). Увеличение разброса силы тока связано, по-видимому, со случайным расположением эмиттеров относительно ячеек сетки, что вызывает некоторую неравномерность в распределении поля. Кривая 3 показывает, что общий ток многоэмиттерного катода равен сумме токов отдельных эмиттеров при тех же значениях на-

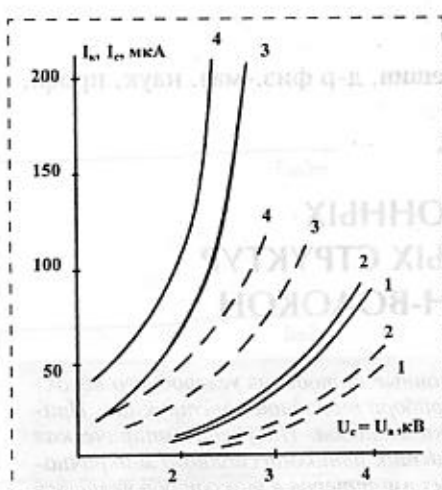


Рис. 2. Характеристики триода с матричным автокатодом (сетка и анод находятся под одним потенциалом):

1–4 — номера экспериментальных приборов; — — ток катода; --- — ток сетки

пряжения. Уменьшение расстояния d (см. рис. 1) до анода при том же потенциале на аноде и сетке вызывает смещение характеристик в область больших токов (кривая 4).

Зависимости сеточного тока, показанные штриховыми линиями с теми же номерами, что и соответствующие кривые катодного тока, позволяют оценить долю тока, перехватываемую сеткой при равенстве анодного и сеточного потенциала, в 15–20 %.

Зависимость силы тока анода от напряжения на сетке снималась при использовании высоковольтного источника в цепи анода, напряжение на сетке управлялось с помощью ЭВМ. Максимальный токоотбор ограничивался значениями единиц миллиампер, поскольку в отпаянных приборах увеличение токоотбора свыше 1 мА при напряжениях анода до 8 кВ приводит к перегреву анода и нарушению вакуума в приборе. Максимальный токоотбор в данной конструкции в кратковременном режиме составлял 5 мА при напряжениях на сетке до 3 кВ и на аноде до 8 кВ.

Увеличение анодного тока в зависимости от сеточного при использовании в качестве парамет-

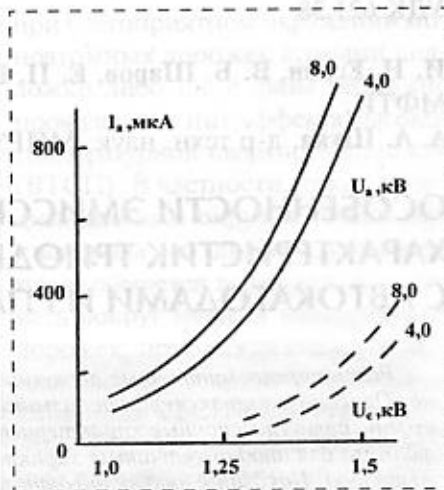


Рис. 3. Сеточные характеристики триода с матричным автокатодом (напряжение анода — параметр):

--- — одного эмиттера; — — всего катода

ра напряжения на аноде представляет рис. 3, пунктирные линии соответствуют одному из эмиттеров, сплошные — всему многоэмиттерному катоду. Напряжение запирающего электрода, при котором анодный ток падает до величины, меньшей 1 мкА, уменьшается при увеличении анодного потенциала, что свидетельствует о частичном проникновении поля анода под сетку.

На рис. 4 изображены зависимости тока анода от напряжения на аноде в области превышения потенциала анода над потенциалом сетки, последний взят в качестве переменного параметра. Ток анода возрастает слабо при увеличении анодного потенциала вследствие экранирующего действия сетки, рост сеточного потенциала увеличивает крутизну характеристик (кривые 1–3).

4. Обсуждение результатов

Коэффициент усиления триода определяли, включая в цепь анода нагрузочное сопротивление R от 1 до 100 МОм и измеряя отношение приращения разности выходного напряжения высоковольтного источника и напря-

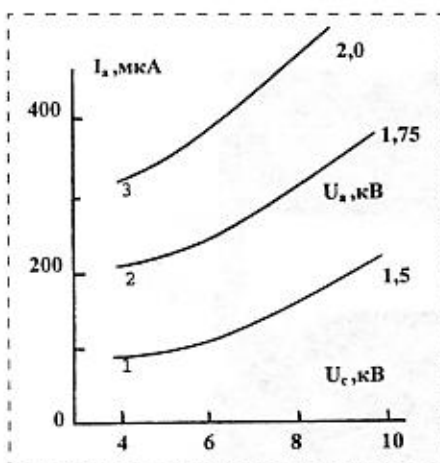


Рис. 4. Анодные характеристики триода с матричным автокатодом при разных напряжениях на сетке

жения на сопротивлении к приращению сеточного напряжения:

$$K_{yc} = \frac{\Delta(U_{в.и} - U_R)}{\Delta U_c}$$

Максимальное значение коэффициента усиления при анодном напряжении 10 кВ составляло 80 при силе тока 50 мкА и сопротивлении нагрузки 100 Ом. При силе тока 500 мкА и сопротивлении нагрузки 10 МОм коэффициент усиления был равен 30. Значения коэффициента усиления в наших экспериментах определялись сопротивлением выходной цепи и ограничивались мощностью источника питания.

Отметим, что полученные в ходе экспериментов зависимости силы эмиссионного тока триода от напряжения на сетке и аноде (рис. 3) могут быть аналогично [8] описаны с помощью полуэмпирического выражения вида

$$i = a(U_c + xU_a)^2 \times \exp\left(\frac{b}{U_c + xU_a}\right), \quad (1)$$

где x — параметр, определяющий вклад анодного напряжения и зависящий от геометрии электродов; $U_c + xU_a$ — эффективное напряжение, характеризующее совместное действие анода и сетки;

a и b — некоторые постоянные для данного прибора величины, зависящие от материала и фактора автокатада и площади его эмитирующей поверхности.

Значения x , полученные в наших экспериментах с помощью ЭВМ, находятся в пределах 0,09—0,31 для различных приборов. Так, для триода, характеристики которого изображены на рис. 4, $x = 0,15$; $b = -2,08 \cdot 10^4$, $a = 1,62 \cdot 10^{-6}$ (А/В²). В этом случае значения напряжения при подстановке в формулу (1) берутся в вольтах, а сила тока — в амперах.

Из формулы (1) следует, что все точки экспериментальных характеристик триода должны лежать на отрезке одной прямой — зависимости, аналогичной прямой Фаулера — Нордгейма, построенной в координатах

$$\lg \frac{i}{(U_c + xU_a)^2} \quad \text{и} \quad \frac{10^4}{U_c + xU_a}$$

Зависимости силы тока триода (рис. 4), перестроенные в этих координатах, имеют, действительно, характерный для автоэмиссионного тока прямолинейный характер (рис. 5). Из графика видно, что увеличение параметра x в формуле (1) приводит к смещению характеристик триода в об-

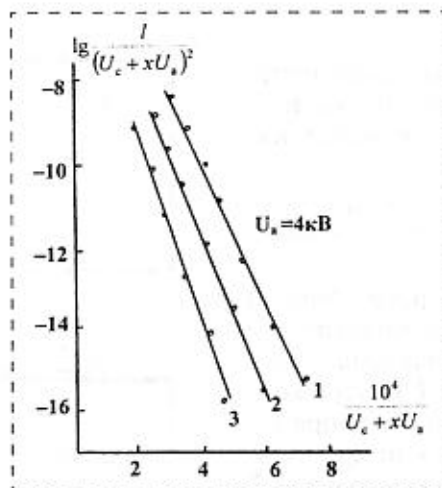


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики триода с матричным автокатодом в координатах Фаулера — Нордгейма

ласть более высоких напряжений, что соответствует уменьшению влияния анодного напряжения. Номерами обозначены зависимости для разных x : $x = 0,1$ (1), $x = 0,15$ (2), $x = 0,2$ (3).

Выводы

На основе матричного автоэлектронного катода из пучков углеродных волокон реализованы экспериментальные триоды, исследованы их анодно-сеточные и анодные характеристики, определены статические параметры: токоперехват сетки, коэффициент усиления. Показано, что вклад отдельных эмиттеров в токоотбор является одинаковым с точностью до $4U/I$ в широком диапазоне токов вплоть до 5 мА. Найдена полуэмпирическая формула для анодно-сеточных характеристик триода, определяющая ход прямых Фаулера — Нордгейма для тока триода.

Список литературы

1. Бондаренко Б. В., Рыбаков Ю. Л., Шешин Е. П., Шука А. А. Автоэлектронные катоды и приборы на их основе // Обзоры по электронной технике, сер. 4. "Электровакуумные и газоразрядные приборы", М., ЦНИИ "Электроника", 1981. Вып. 4. 58 с.
2. Ненакаливаемые катоды / Под ред. Елинсона М. И. М.: Сов. радио, 1974. 336 с.
3. Stewart D., Wilson P. Recent developments in broad area field emission cold cathodes // Vacuum, 1980. Vol. 30. N 11/12. P. 532—537.
4. Spindt C. A., Holland C. E., Stowell R. D. Field emission cathode array development for high-current density application // Appl. of Surf. Sci. 1983. Vol. 16. N 1/2. P. 268—276.
5. Бондаренко Б. В., Баканова Е. С., Черепанов А. Ю., Шешин Е. П. Влияние формовки на структуру углеродных автокатодов // РЭ. 1985. Т. 30. № 11. С. 2234—2238.
6. Бондаренко Б. В., Шаховской А. Г., Шешин Е. П. Динамика эмитирующей поверхности углеродно-волоконных автокатодов при длительной работе // РЭ. 1987. Т. 32. № 1. С. 199—201.
7. Бондаренко Б. В., Черепанов А. Ю., Шешин Е. П. Система для измерения эмиссионных характеристик автокатодов // ПТЭ. 1987. № 1. С. 245.
8. Бондаренко Б. В., Макуха В. И. Диод и триод с лезвийным автокатодом // Электронная техника, сер. 4. "Электровакуумные и газоразрядные приборы", 1974. Вып. 7. С. 29—33.

УДК 681.128

В. М. Ачильдиев, канд. техн. наук, В. Н. Дрофа,
А. А. Недодаев, В. М. Рублев, канд. техн. наук,
НПП "Регуста",
А. С. Фадеев, канд. техн. наук,
директор ЦЭНКИ при РКА

УРОВЕНЬ ЭЛЕКТРОННЫЙ ЦИФРОВОЙ

Рассматривается конструкция цифрового электронного уровня УЭЦ-002, состоящего из микромеханического кремниевого акселерометра, аналого-цифрового преобразователя и жидкокристаллического индикатора (дисплея).

Широко известный жидкостной уровень представляет собой нуль-индикатор горизонта и позволяет выставлять изделия (элементы конструкции) в плоскость горизонта.

На практике часто возникает задача определения положения изделия относительно плоскости горизонта, что требует использования уровня горизонтального измерительного типа. Таким измерителем как раз и является *уровень электронный цифровой*, основой которого служит двухосный микромеханический кремниевый акселерометр (МКА) [1, 2], выходное напряжение которого пропорционально значению проекции ускорения g_i свободного падения на две оси его чувствительности. Значение этой проекции зависит от положения корпуса измерителя относительно горизонта и определяется двумя углами φ_i ($i = 1, 2$) его наклона к горизонту:

$$U_{g_i} = K g \sin \varphi_i,$$

где $i = X, Y$ — оси чувствительности; K — масштабный коэффициент.

Таким образом, выходные напряжения с измерителя определяются измеряемым углом наклона площадки по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Общий вид уровня цифрового электронного УЭЦ-002 [3] показан на рис. 1, а его конструкция — на рис. 2.

На лицевой стороне 4 корпуса 5 уровня (рис. 2) установлены жидкокристаллический индикатор 3 для индикации измеряемых углов наклона, переключатель 2 и выключатель питания 1. Внутри корпуса 5 размещены источник постоянного напряжения 6, измеритель (микромеханический кремниевый акселерометр) ускорения свободного падения 7, операционный усилитель 8, аналого-цифровой преобразователь 9 и блок индикации режимов измерения 10.



Рис. 1. Уровень электронный цифровой УЭЦ-002

Все электроэлементы и МКА размещаются на стеклотекстолитовой плате с размерами $90 \times 52 \times 2$ мм.

Плата устанавливается в пластмассовый корпус промышленного изготовления PP265SW с габаритными размерами $131 \times 60 \times 30$ мм. В корпусе предусмотрен отсек под элемент питания типа "Крона" (GP 1604G/GLF 22).

Положение (1) переключателя 2 соответствует измерению углов наклона относительно оси, расположенной вдоль длинной стороны корпуса при-

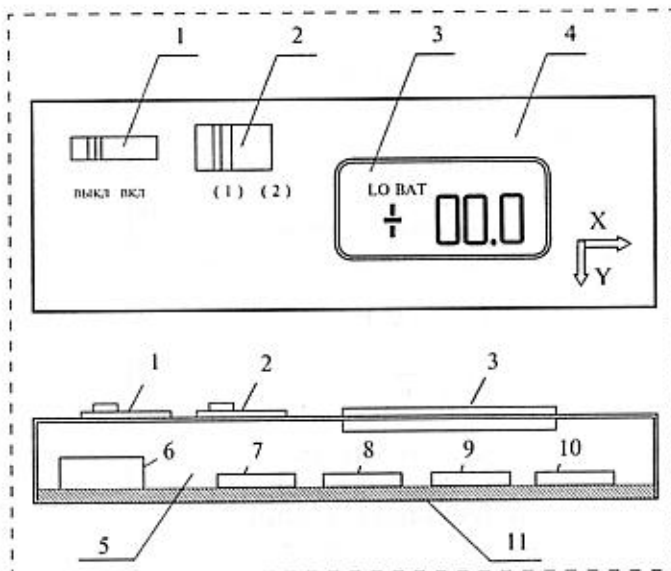


Рис. 2. Конструкция уровня электронного цифрового

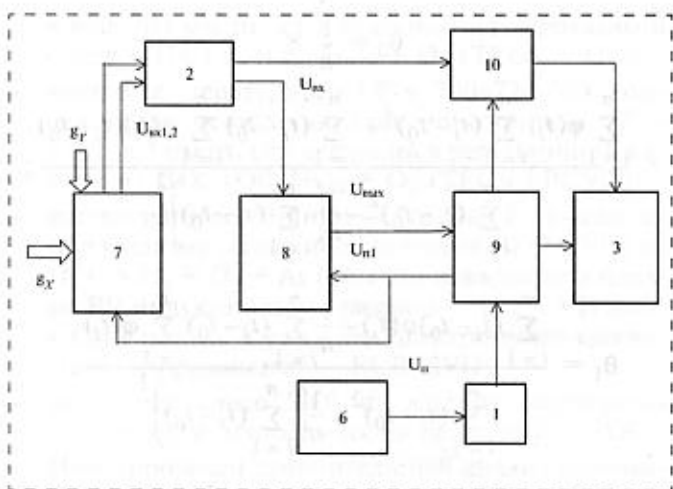


Рис. 3. Структурная схема уровня электронного цифрового

бора (ось X), положение (2) — в перпендикулярном направлении (ось Y). При этом на индикаторе с левой стороны индицируется горизонтальная или вертикальная черта.

Напряжение $U_{вх}$ (рис. 3) с выхода МКА 7 через переключатель 2 (рис. 3) поступает на вход операционного усилителя 8, коэффициент усиления которого выбран из условия обеспечения необходимого диапазона измерения углов наклона, а в самом усилителе осуществляется частотная коррекция, препятствующая проникновению на выход усилителя высокочастотных составляющих, присутствующих в сигнале $U_{вх}$.

На выходе усилителя 8 установлен делитель напряжения (не показан), согласующий диапазон изменения $U_{вх}$ с диапазоном напряжений в аналого-цифровом преобразователе 9.

Измеритель ускорения свободного падения 7 и операционный усилитель 8 питаются от стабильного источника $U_{н1}$ аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 9, который подключен через выключатель 1 к источнику постоянного напряжения 6. АЦП преобразует аналоговый сигнал $U_{вх}$ с выхода усилителя 8 в цифровой код, который поступает на жидкокристаллический индикатор 3. Схема включения жидкокристаллического индикатора 3 обеспечивает индицирование трех разрядов. Режим работы аналого-цифрового преобразователя 9 выбран таким образом, чтобы цифровой код на выходе преобразователя соответствовал наклону измерителя в угловых градусах.

В устройстве предусмотрена дополнительная индикация (блок индикации 10) о разрядке источника питания 6 ниже допустимого уровня (индикация "LO BAT").

Основные технические характеристики уровня электронного цифрового УЭЦ-002

- Масса прибора, не более, г 200
- Габаритные размеры, мм $145 \times 60 \times 30$
- Питание, В 9
- Потребляемая мощность, мВт 30
- Погрешность измерения углов в диапазоне $0-5^\circ$, % 0,5
- Цена младшего разряда АЦП, ° 0,1

Цифровой измеритель уклонов настроен таким образом, чтобы при установке корпуса рабочей поверхностью 11 (см. рис. 2) на эталонную горизонтальную относительно двух осей плоскость на жидкокристаллическом индикаторе 3 при нормальной температуре ($t = 20^\circ\text{C}$) индицировались нули. При развороте прибора на угол $\varphi = 90^\circ$ уровень настраивается (при нормальной температуре) на индицирование показаний $90 \pm 0,1^\circ$. Угол настройки φ_n может меняться в зависимости от требуемого диапазона измерения.

Инструментальная погрешность измерения углов с использованием данного цифрового измерителя определяется погрешностью датчика ускорения свободного падения ($\leq 0,1\%$ измеряемого угла в диапазоне до 30°) и аналого-цифрового преобразователя (цена младшего разряда). Методическая погрешность измерения зависит от измеряемого угла и внешней температуры.

Для экспериментальной проверки точности уровня от угла наклона основания использовался наклонно-поворотный стол НПС-106, обеспечивающий выставку уровня под любым фиксированным углом к горизонту с погрешностью до $20''$. Испытания проводились в диапазоне углов от -6 до $+6^\circ$ при температуре $+20^\circ\text{C}$. Суммарная погрешность измерения не превысила $0,30^\circ$ во всем диапазоне измерения.

При использовании данного уровня для измерения углов в диапазоне от 6 до 90° необходимо вводить поправку $\Delta\varphi_{ин}$, обусловленную тем, что при настройке акселерометра не учитывается нелинейность его выходного сигнала (рис. 4).

При выходном сигнале с акселерометра

$$U_a = K g \sin \varphi \quad (1)$$

на индикаторе будет индицироваться угол φ_n , значение которого может быть получено из соотношения

$$U_a = \frac{U_{\varphi_m} - U_0}{\varphi_n} \varphi_n, \quad (2)$$

где φ_n — угол настройки, при котором обеспечивается равенство измеряемого и индицируемого углов ($\varphi_n = \varphi_n$); U_0 — нулевой сигнал при установке измерителя на горизонтальной площадке ($\varphi = 0$).

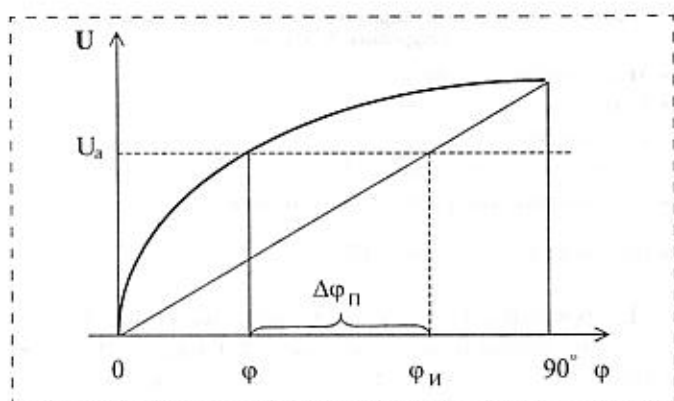


Рис. 4. Величина поправки из-за нелинейности выходного сигнала акселерометра

Из выражений (1) и (2) получим поправку:

$$\Delta\varphi_{\text{нл}} = \arcsin \frac{U_a}{Kg} - \frac{U_a \varphi_n}{U_{\varphi_n} - U_0} \quad (3)$$

Поправка $\Delta\varphi_{\text{нл}}$ может быть представлена в виде таблицы в диапазоне углов $0-\varphi_n$.

При этом угол наклона площадки будет определяться по показаниям уровня:

$$\varphi = \varphi_n + \Delta\varphi_n \quad (4)$$

Одним из недостатков микромеханических акселерометров является зависимость их показаний от температуры окружающей среды. Характер изменения показаний уровня от температуры, как показали испытания, в основном близок к линейному, поэтому показания уровня могут быть скорректированы с использованием зависимости

$$\varphi(t) = \theta_0 + \theta_1(t - t_0),$$

где $\varphi(t)$ — показания уровня, °; θ_0 — коэффициент, характеризующий показания уровня при нормальной температуре; θ_1 — коэффициент, характеризующий чувствительность датчика в зависимости от температуры; t_0 — нормальная температура ($t_0 = 20^\circ\text{C}$).

Коэффициенты θ_0 и θ_1 для каждого уровня определяются по результатам испытаний в рабочем диапазоне температур. При использовании метода наименьших квадратов будем иметь:

$$\theta_0 = \frac{1}{n} \times \frac{\sum_{i=1}^n \varphi(t_i) \sum_{i=1}^n (t_i - t_0)^2 - \sum_{i=1}^n (t_i - t_0) \sum_{i=1}^n \varphi(t_i)(t_i - t_0)}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_0)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (t_i - t_0) \right)^2};$$

$$\theta_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t_0) \varphi(t_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - t_0) \sum_{i=1}^n \varphi(t_i)}{\sum_{i=1}^n (t_i - t_0)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (t_i - t_0) \right)^2},$$

где $\varphi(t_i)$ — показание уровня при фиксированной температуре; n — число измерений в заданном диапазоне температур.

Погрешность аппроксимации $\delta\varphi$ при этом определяется выражением

$$\delta\varphi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\varphi(t_i) - (\theta_0 + \theta_1 t_i)]^2}{n}}.$$

Поправочный коэффициент θ_1 записывается в паспорт на каждый уровень. На основании этого коэффициента может вводиться поправка на показания уровня в широком диапазоне температур.

Проведенные испытания уровня в термокамере "Чегет-7" при изменении температуры от -20 до $+50^\circ\text{C}$ в диапазоне углов $\varphi \leq 30^\circ$ показали, что погрешность аппроксимации не превысила $0,31^\circ$. При этом поправочный коэффициент θ_1 , определяющий чувствительность акселерометра к температуре, в указанном выше диапазоне углов практически не изменялся.

Рассматриваемый уровень электронный цифровой может найти широкое применение в строительстве, а также в ряде других областей, связанных с измерениями углов наклона площадок, в том числе при проведении спасательных работ.

Список литературы

1. Riedel B. Surface Micromachined Monolithic Accelerometer // Analog Dialogue 27-2. 1993.
2. Weinberg H. Accelerometer — FANTASY and REALITY // Analog Dialogue. V. 33. 1999.
3. Ачильдиев В. М., Дрофа В. Н., Недодаев А. А., Рублев В. М., Фадеев А. С. Цифровой измеритель уклонов. Положительное решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2000106731/28 от 13.03.2000 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МСТ

УДК 621.3

А. Д. Просий, В. Л. Евдокимов,
А. Д. Сулимин, канд. техн. наук,
И. А. Вахин, Е. С. Сельков,
АООТ "НИИМЭ и завод "Микрон"

ФОРМИРОВАНИЕ УЗЛА МЕЖЭЛЕМЕНТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ СУБМИКРОННЫХ СБИС С ПОМОЩЬЮ МЕЛКИХ КАНАВОК (ТЕХНОЛОГИЯ STI) НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССА ХИМИКО-МЕХАНИЧЕСКОЙ ПОЛИРОВКИ

Обсуждаются технологические аспекты формирования узла межэлементной изоляции субмикронных СБИС с помощью мелких канавок (STI), достоинства, области применения технологии STI и ключевые проблемы по ее интеграции в технологические маршруты изготовления субмикронных СБИС. Сформулированы требования к основным технологическим процессам (травлению канавок, заполнению объема изолирующих канавок диэлектрическим материалом, глобальной планаризации, химико-механической полировке) и важнейшее направление разработок, обеспечивающих успешную реализацию технологии STI.

По мере уменьшения минимальных топологических размеров элементов СБИС технология формирования узла межэлементной изоляции неизбежно претерпевает существенную эволюцию (табл. 1) [1].

При переходе к производству КМОП и БиКМОП СБИС с проектными нормами 0,35 мкм и менее традиционная технология формирования узла ме-

жэлементной изоляции, основанная на использовании ряда разновидностей процесса локального окисления кремниевой подложки (LOCOS/Modified LOCOS), вытесняется технологией формирования узла изоляции с помощью мелких канавок (Shallow Trench Isolation, STI).

Целью настоящей статьи является анализ достоинств применения технологии STI и ключевых технологических проблем формирования узла межэлементной изоляции с помощью мелких канавок.

Необходимость использования технологии STI для формирования узла межэлементной изоляции СБИС определяется тем обстоятельством, что при производстве изделий с проектными нормами 0,35 мкм и менее возможности дальнейшего повышения плотности упаковки элементов (т. е. минимизации линейных размеров областей изоляции и транзисторных мезообластей) при использовании методов локального окисления кремниевой подложки оказываются практически исчерпанными вследствие образования достаточно протяженных (длиной порядка 0,20–0,25 мкм) участков "птичьего клюва" в мезообластях близ краев отверстий в жесткой маске из Si_3N_4 .

Кроме того, в отличие от технологии STI, методы локального окисления кремниевой подложки не обеспечивают глобальной планарности поверхности кремниевых структур со сформированными участками полевого оксида, принципиально необходимой (в рассматриваемом диапазоне проектных норм) для успешной реализации процессов субмикронной фотолитографии. Это обусловлено ограниченностью значений глубины фокусного расстояния установок проекционного совмещения и экспонирования (DOF Budget).

Технология STI обеспечивает не только минимизацию топологических размеров областей межэлементной изоляции, но и позволяет добиться повышения устойчивости транзисторных КМОП-структур к эффекту "защелкивания", а также способствует увеличению напряжения пробоя между *p-n*-переходами смежных транзисторов, примыкающих к изолирующим канавкам с противоположных сторон.

Наибольшее распространение технология STI получила для формирования узла межэлементной изоляции КМОП и БиКМОП СБИС, изготавливаемых с проектными нормами 0,35 мкм и менее, в которых толщина приборного слоя кремния не превышает 1,0 мкм. При производстве изделий с проектными нормами 0,13–0,25 мкм технология STI является в настоящее время практически един-

Таблица 1

Области применения технологии STI

Проектная норма, мкм	0,35	0,25	0,18	0,15	0,13	0,1	0,07
Применяемая технология изоляции элементов	LOCOS (Modified)	STI/SOI					
	STI/SOI						

ственной из применяемых на практике технологий формирования узла межэлементной изоляции [2]. Вместе с тем, с чисто технической точки зрения не существует принципиальных ограничений, препятствующих использованию рассматриваемой технологии формирования узла межэлементной изоляции и при производстве изделий, изготавливаемых с проектными нормами 0,5—0,65 мкм.

Сущность технологии STI, применяемой для формирования узла межэлементной изоляции субмикронных СБИС, состоит в следующем:

- формирование в кремниевой подложке канавок сравнительно небольшой глубины (от 250 до 500—600 нм) в промежутках между транзисторными областями, поверхность которых закрыта участками жесткой маски (имеющей обычно структуру $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$);
- заполнение объема вытравленных канавок диэлектрическим материалом (как правило, SiO_2), причем на завершающей стадии этого процесса используются различные методы химического осаждения диэлектрических слоев из газовой фазы;
- удаление излишков диэлектрика с поверхности транзисторных мезаобластей таким образом, чтобы добиться глобальной планарности поверхности диэлектрика в области изолирующих канавок и, в идеальном случае, копланарности поверхностей изолирующих канавок и кремния в мезаобластях.

Схематическое изображение трех альтернативных технологических схем формирования узла межэлементной изоляции СБИС с помощью толстого слоя SiO_2 , локального окисления кремниевой подложки (LOCOS) и мелких канавок (STI) представлено на рис. 1 (см. вторую сторону обложки) [1].

Интеграция технологии STI в технологические маршруты изготовления субмикронных КМОП и БиКМОП СБИС должна проводиться с учетом, в первую очередь, влияния выбранной технологии формирования узла межэлементной изоляции на электрофизические характеристики транзисторных структур [3].

В частности, необходимо учитывать влияние геометрии, физической структуры и технологических процессов формирования узла межэлементной изоляции на механизмы возникновения и силу тока утечки p - n -переходов транзисторов (включая токи утечки собственно в подложку (карман) и токи утечки между p - n -переходами смежных транзисторов, примыкающих к изолирующей канавке с противоположных сторон), а также на напряжение пробоя собственно p - n -переходов транзисторов и напряжение пробоя участка кремниевой структуры, образуемого изолирующей канавкой и примыкающими к ней с противоположных сторон p - n -переходами смежных транзисторов.

Кроме того, необходимо принимать во внимание тот факт, что поведение реальных транзистор-

ных структур (в которых поверхность диэлектрического материала в изолирующих канавках, пересекаемых поликремниевыми затворными шинами, не является планарной и/или углублена в подложку относительно поверхности мезаобластей) может осложняться следующими причинами:

- возникновением "обратного" эффекта узкого канала (Reverse Narrow Channel Effect), сопровождающегося значительным возрастанием силы тока утечки p - n -переходов МОП-транзисторов в предпороговом режиме и появлением характерного "перегиба" (Kink) на предпороговой ветви вольт-амперной характеристики МОП-транзисторов;
- появлением (в случае, когда радиус кривизны участков канавки, расположенных близ ее верхних углов, выбран неоптимальным образом) паразитных МОП-транзисторов, области канала которых располагаются близ указанных верхних углов канавок;
- снижением порогового напряжения паразитных МОП-транзисторов (иной разновидности), каждый из которых образован слоем диэлектрического материала в канавке, примыкающей к ней с одной стороны областью истока рабочего транзистора и областью кармана одноименного типа проводимости — с противоположной стороны.

Более того, обязательно следует принимать во внимание влияние присутствия в структуре СБИС изолирующих канавок (в частности, их геометрической формы, размеров и плотности расположения) на процессы образования дефектов кристаллической решетки в транзисторных мезаобластях (а следовательно, и на электрофизические характеристики активных элементов СБИС). Эти процессы обусловлены наличием в таких структурах локальных источников концентрации механических напряжений, располагающихся, как правило, близ верхних и нижних углов и донной части канавки [4].

С учетом вышеназванных проблем реализации высококачественной технологии формирования узла межэлементной изоляции СБИС с помощью STI можно выделить основные задачи, решаемые при разработке рассматриваемой технологии.

Обеспечение высокого качества диэлектрического материала, предназначенного для заполнения объема изолирующих канавок. Необходимо контролировать следующие характеристики материала:

- отличие его реального стехиометрического состава от заданного;
- минимальное содержание в материале посторонних элементов (например, свободного и связанного водорода) и связанных функциональных групп (таких, как гидроксильные группы);
- концентрацию в материале микропримесей металлов Al, Fe, Cr, Co, Ni, Ta, Ti, V, W не более $\approx 1,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, щелочных металлов Na, K, Li — $\ll 1,0 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$;

- низкую скорость травления материала в растворах на основе HF для совместимости рассматриваемой технологии формирования узла межэлементной изоляции с операциями стандартного технологического маршрута изготовления КМОП и БиКМОП СБИС и минимизации потерь диэлектрического материала в объеме изолирующих канавок на соответствующих операциях химической обработки поверхности подложек;
- низкую концентрацию в материале объемных электронных и дырочных ловушек;
- низкую плотность ловушек и поверхностных состояний на границе раздела диэлектрического материала, заполняющего объем канавки, с кремниевой подложкой;
- наличие у диэлектрического материала плотной, свободной от пор, структуры при высокой его микротвердости, что обеспечивает устойчивость поверхности материала к образованию на ней дефектов (типа микроскопических царапин) при полировке на этапе планаризации поверхности диэлектрического слоя в объеме канавок.

Выбор методов получения слоев рассматриваемого диэлектрического материала, обладающих необходимым спектром технологических возможностей. К числу важнейших из этих возможностей можно отнести:

- способность обеспечения заполнения диэлектрическим материалом объема изолирующих канавок (включая канавки с практически вертикальными боковыми стенками), имеющих субмикронную (0,1–0,13 мкм) ширину и высокое значение геометрического параметра Aspect Ratio (до (3,0–5,0):1), без образования в объеме указанных канавок пустот и стыков (в точках соприкосновения участков слоя диэлектрического материала, осажденного на противоположные стенки канавки [5, 6];
- сглаживание уступов топологического рельефа поверхности структуры СБИС с изолирующими канавками, образованного при осаждении на ее поверхность диэлектрического слоя [7];
- обеспечение локальной планаризации поверхности осажденного диэлектрического слоя;
- обеспечение минимального (совместимого с требованиями технологии производства субмикронных СБИС) термического бюджета технологических операций, сопровождающих получение слоя диэлектрического материала в объеме изолирующих канавок [5].

Обеспечение достижения требуемых геометрических параметров изолирующих канавок. Для решения этой задачи необходимы:

- контроль линейных размеров канавок в плане [8];
- контроль угла наклона боковых стенок изолирующих канавок к плоскости подложки [9] (выбираемого, как правило, в диапазоне 78–88°);

- достижение практически одинаковых углов наклона боковых стенок канавок по всей поверхности подложки, особенно для канавок, имеющих близкие значения линейных размеров в плане (допустимая вариация угла наклона боковых стенок изолирующих канавок к плоскости подложки при производстве СБИС с проектными нормами 0,25 мкм и менее составляет, как правило, около $\pm 1^\circ$);
- контроль глубины формируемых канавок в материале подложки;
- обеспечение по всей поверхности подложки одинаковой глубины изолирующих канавок независимо от их геометрических размеров в плане;
- обеспечение требуемых значений радиуса кривизны участков, расположенных на боковых стенках изолирующей канавки близ ее верхних и нижних углов, а также радиуса кривизны донной части канавки [3].

Обеспечение глобальной планарности поверхности диэлектрического материала, заполняющего объем изолирующих канавок [10]. Для решения этой задачи необходимо обеспечить:

- достижение копланарности поверхности диэлектрика, заполняющего объем канавок, и поверхности кремния в транзисторных мезаобластях без ухудшения локальной планарности поверхности указанного диэлектрика на отдельных участках поверхности кристалла СБИС независимо от плотности размещения элементов топологического рисунка (транзисторных мезаобластей и изолирующих канавок) в подвергаемой планаризации структуре, а также от линейных размеров в плане единичных топологических элементов (преимущественно канавок) [11];
- полное удаление слоя диэлектрического материала, осажденного для заполнения изолирующих канавок, с поверхности жесткой маски, покрывающей транзисторные мезаобласти;
- исключение в предельном случае необходимости использования, в дополнение к химико-механической полировке (ХМП), иных технологических приемов (методов планаризации) [12] по частичному уменьшению высоты топологического рельефа поверхности структур СБИС, покрытых осажденным для заполнения канавок слоем диэлектрика или по сглаживанию уступов. К таким приемам относятся:

— "обратное" реактивное ионное травление диэлектрического слоя, осажденного для заполнения объема изолирующих канавок, над поверхностью транзисторных мезаобластей с использованием "инверсного" (по отношению к топологическому рисунку областей межэлементной изоляции) рисунка фоторезистивной маски (Reverse Mask Etchback) [13];

— преднамеренное формирование на поверхности отдельных транзисторных мезаобластей (поверх соответствующих участков жесткой маски) "ложных" (Dummy Pattern) топологических эле-

ментов для эффективной "регуляризации" плотности размещения элементов топологического рисунка на подвергаемой глобальной планаризации поверхности кристалла СБИС с изолирующими канавками.

Требования к ключевым технологическим процессам, обеспечивающим успешную интеграцию технологии STI в технологические маршруты изготовления субмикронных СБИС, представлены в табл. 2.

К настоящему времени исследован и разработан целый ряд технологических процессов, потенциально пригодных для заполнения объема изолирующих канавок диэлектрическим материалом (SiO_2). Среди них необходимо отметить следующие процессы осаждения:

- низкотемпературного ($T \approx 400\div 550^\circ\text{C}$) при атмосферном либо субатмосферном ($P \approx$

Таблица 2

Ключевые технологические процессы, обеспечивающие успешную интеграцию технологии STI в технологические маршруты изготовления субмикронных СБИС

Технологический процесс (стадия формирования узла межэлементной изоляции)	Требования к технологическому процессу
Травление изолирующих канавок в кремниевой подложке	Контроль линейных размеров изолирующих канавок. Контроль глубины вытравливаемых канавок независимо от топологии формируемых структур (в том числе исключение эффектов микро- и макроагрузки при сухом травлении). Контроль угла наклона к плоскости подложки боковых стенок изолирующих канавок (выбираемого в диапазоне $70\text{--}88^\circ$) с погрешностью не хуже $\pm 1^\circ$ и контроль профиля боковых стенок канавок (для обеспечения возможности заполнения объема канавок диэлектрическим материалом без образования пустот). Контроль профиля поперечного сечения изолирующих канавок, в частности, радиуса кривизны донной части канавок и участков близ их верхних углов (для исключения возможности генерации и распространения дислокаций в транзисторные мезаобласти и минимизации термомеханических напряжений в изолированных структурах)
Заполнение объема изолирующих канавок диэлектрическим материалом	Требования к диэлектрическому материалу, предназначенному для заполнения объема изолирующих канавок: • минимальное содержание микропримесей (свободного и связанного H, групп -ОН, тяжелых и щелочных металлов); • низкая скорость травления в растворах на основе HF; • низкая концентрация объемных ловушек носителей заряда (электронов и дырок); • низкие значения плотности ловушек носителей заряда и поверхностных состояний на границе раздела диэлектрика с кремниевой подложкой; • плотная, беспористая структура; • высокие микротвердость и устойчивость к образованию поверхностных микроцарапин при ХМП Требования к технологическому процессу осаждения диэлектрических слоев, применяемому для заполнения объема изолирующих канавок: • обеспечение возможности заполнения диэлектрическим материалом объема изолирующих канавок различной ширины (в том числе субмикронных, имеющих значения параметра Aspect Ratio (AR) на уровне: $AR \approx (3,0\text{--}5,0)$) без образования пустот и стыков (последние травятся в растворах на основе HF быстрее, чем объемный материал, что приводит к образованию шелевидных канавок на поверхности областей межэлементной изоляции); • обеспечение возможности сглаживания уступов топологического рельефа на поверхности обрабатываемых структур в процессе осаждения слоя диэлектрика; • исключение необходимости высокотемпературной ($T > 850^\circ\text{C}$) обработки для уплотнения осажденного слоя диэлектрика; • минимизация количества диэлектрического материала, удаляемого с поверхности формируемых структур на операциях планаризации топологического рельефа ("обратное" травление, ХМП)
Планаризация поверхности формируемой структуры "обратным" травлением (Etchback) осажденного слоя диэлектрика	Обеспечение селективности травления слоя диэлектрика, осажденного для заполнения изолирующих канавок, относительно фоторезиста на уровне $\approx 1,0$. Достижение низкой поверхностной плотности микродефектов (микрочастиц, следов неудаленного фоторезиста) при обработке формируемых структур. Отсутствие загрязнения поверхности подложек органическими соединениями и атомами металлов
Глобальная планаризация поверхности формируемой структуры с изолирующими канавками методом ХМП	Достижение высокой селективности полировки SiO_2 относительно Si_3N_4. Исключение наличия неудаленных остатков слоя SiO_2 на поверхности жесткой маски, покрывающей транзисторные мезаобласти. Достижение высокой эффективности планаризации поверхности формируемых структур на этапе удаления излишков слоя SiO_2, осажденного для заполнения объема изолирующих канавок, с поверхности жесткой маски с помощью ХМП, в том числе: • достижение глобальной поверхности формируемых структур независимо от размеров и плотности расположения элементов топологического рисунка (изолирующих канавок и транзисторных мезаобластей); • достижение копланарности поверхностей диэлектрика в области изолирующих канавок и кремниевой подложки в транзисторных мезаобластях (в том числе для исключения эффекта Poly Wrap Around и предотвращения, тем самым, возникновения паразитной транзисторной структуры). Минимизация (и, в предельном случае, исключение) эффектов неконтролируемого образования микрорельефа на поверхности формируемых структур (эффектов Dishing, эрозий жесткой маски, статического химического травления диэлектрика в области изолирующих канавок). Обеспечение возможности глобальной планаризации поверхности формируемых структур с изолирующими канавками только за счет применения ХМП (исключение необходимости дополнительного использования других методов планаризации поверхности для уменьшения сглаживания общей высоты топологического рельефа уступов поверхности осажденного в канавки слоя диэлектрика)

- ≈ 600÷700 мм рт. ст.) давлении из парогазовой смеси (ПГС) $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 + \text{O}_3$ (TEOS + O_3);
- высокотемпературного ($T \approx 700\div 720^\circ\text{C}$) конформного осаждения при пониженном ($P \approx 0,1\div 1,0$ мм рт. ст.) давлении в реакционной камере из ПГС $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4 + \text{O}_2$ (TEOS LPCVD);
- направленного (Bottom — Up Gap Fill) осаждения в плазме высокой плотности (HDP CVD) из ПГС $\text{SiH}_4 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ (обычно осаждение в плазме ВЧ индукционного разряда — ICP CVD либо в СВЧ плазме в условиях электронного циклотронного резонанса — ECR CVD);
- получение слоев SiO_2 из жидких растворных композиций, наносимых на центрифуге (SOG).

Нами проведен сравнительный анализ принципиальной применимости и целесообразности использования вышеуказанных методов получения диэлектрических слоев для заполнения объема изолирующих канавок при изготовлении узла межэлементной изоляции СБИС субмикронного уровня по ряду технологически значимых критериев (табл. 3) [1, 5, 6]. Из представленных данных следует, что с точки зрения соответствия всему ком-

плексу требований, предъявляемых к технологическому процессу осаждения диэлектрических слоев, заполнению объема узких изолирующих канавок диэлектриком в наибольшей степени удовлетворяет процесс осаждения в плазме высокой плотности.

Общепризнанным и высокоэффективным методом, применяемым в технологии STI для удаления с поверхности транзисторных мезообластей, покрытых участками жесткой маски, излишков диэлектрического слоя, осажденного для заполнения объема изолирующих канавок, и получения планарной поверхности заполненных диэлектрическим материалом канавок, является метод ХМП, который в настоящее время можно считать, по существу, единственным методом, пригодным для достижения по-настоящему *глобальной планарности* поверхности топологического рельефа структур субмикронных СБИС.

Процессы ХМП играют *ключевую роль* в реализации промышленной технологии получения узла межэлементной изоляции субмикронных СБИС с помощью мелких канавок (технология STI), по-

Таблица 3

Критерии выбора оптимального технологического процесса, применяемого для заполнения диэлектрическим материалом объема изолирующих канавок в технологии STI

Критерий	APCVD/SACVD (TEOS + O_3)	TEOS LPCVD	HDP CVD	SOG
Возможность заполнения диэлектрическим материалом объема субмикронных изолирующих канавок, имеющих значения геометрического параметра Aspect Ratio (AR) на уровне: $\text{AR} \gg 1,0$, без образования пустот	Да	Нет ($\text{AR}_{\text{max}} \approx 1,2$)	Да	Да
Необходимость дополнительной термообработки (для уплотнения осажденного в канавки слоя диэлектрика) при высокой ($T \approx 1100^\circ\text{C}$) температуре	Да	Да	Нет (достаточно применения термообработки при $T \approx 850^\circ\text{C}$ либо дополнительная термообработка не используется вообще)	Да
Скорость травления осажденного в канавки слоя диэлектрика в растворах на основе HF (по отношению к скорости травления термически выращенного SiO_2)	5,0	2,1	1,1 (обычно 1,3—1,6)	—
Скорость травления осажденного в канавки слоя диэлектрика в растворах на основе HF (по отношению к скорости травления термически выращенного SiO_2) после дополнительной термообработки ($T \approx 850^\circ\text{C}$)	1,3	1,1	1,1 (обычно 1,2—1,3)	1,1
Отношение скорости удаления при ХМП слоев SiO_2 (осажденного для заполнения изолирующих канавок) и Si_3N_4 (жесткой маски)	≈(3,0—5,0)	≈(3,0—5,0)	≈(3,0—5,0)	≈(3,0—5,0)
Объемная усадка осажденного в изолирующие канавки слоя диэлектрика после дополнительной термообработки ($T \approx 850^\circ\text{C}$), %	5—6	3,4	0—0,8	22—28
Склонность к поглощению (абсорбции) влаги из атмосферного воздуха и химических растворов	Да (в том числе после дополнительной термообработки)	Нет	Нет	Да (в том числе после дополнительной термообработки)
Краткое описание процесса осаждения слоя диэлектрика в изолирующие канавки	Предусматривает формирование барьерного (Liner) и покрывающего (Cap) слоев путем осаждения (обычно плазмохимического) из газовой фазы	Одностадийный процесс	Одностадийный процесс	Предусматривает формирование барьерного (Liner) и покрывающего (Cap) слоев путем осаждения (обычно плазмохимического) из газовой фазы

сколько технические возможности существующих технологических процессов и оборудования ХМП определяют не только технико-экономическую целесообразность перехода к использованию технологии STI (в том числе при производстве изделий, для которых возможно использование альтернативных методов формирования узла изоляции), но и принципиальную возможность дальнейшего уменьшения топологических размеров элементов СБИС, которому неизбежно сопутствуют все более жесткие технические требования к качеству процесса планаризации поверхности областей изолирующих канавок.

Применительно к задаче глобальной планаризации поверхности изолирующих канавок, заполненных диэлектрическим материалом, в технологии STI процессы ХМП должны отвечать следующим основным требованиям.

- ♦ Обеспечение достаточно высоких значений отношения скорости удаления диэлектрического материала, заполняющего объем изолирующих канавок (SiO_2), к скорости удаления слоя Si_3N_4 , который представляет собой верхний слой жесткой маски (со структурой $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$), покрывающей поверхность транзисторных мезаобластей. Требуемое качество планаризации поверхности заполненных диэлектриком изолирующих канавок определяется главным образом конструкцией применяемого оборудования ХМП и возможностями регулирования значений параметров режима технологического процесса. Наивысшее качество планаризации достигается применением полировальных суспензий, разработанных специально для нужд технологии STI и обеспечивающих предельно высокие значения параметра селективности $K_c = V_{\text{SiO}_2} / V_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ ($S_{\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2} \geq 100:1$). К числу дополнительных преимуществ, обеспечиваемых проведением процесса планаризации поверхности изолирующих канавок в режиме высокой селективности процесса полировки K_c следует отнести возможность оснащения оборудования ХМП сравнительно простыми по конструкции датчиками окончания технологического процесса.
- ♦ Минимизация и, в пределе, полное исключение образования в области изолирующих канавок характерного, с плавными краями, рельефа поверхности SiO_2 (так называемый Dishing-эффект) [3, 10, 14, 15], наблюдаемого в основном для канавок, имеющих линейные размеры в плане более 10 мкм (глубина указанного рельефа применительно к технологии STI в большинстве случаев не должна превышать 100 нм во всем диапазоне характерных значений ширины изолирующих канавок на кристалле, составляющей от единиц до сотен микрометров). Для выполнения данного требования при использо-

вании полировального оборудования наиболее распространенной конструкции требуется, как правило, применение полировальных суспензий, обеспечивающих при надлежащем выборе материала полировальной подушки и режима обработки высокие значения селективности обработки K_c . Переход к использованию полировального оборудования новой конструкции и/или принципиально новых типов расходных материалов позволяет достичь существенно меньших (около 15–20 нм для канавок шириной несколько сотен микрометров) значений высоты обусловленного Dishing-эффектом рельефа поверхности диэлектрического материала в области изолирующих канавок.

- ♦ Минимизация эрозии поверхности жесткой маски (со структурой $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$), покрывающей поверхность транзисторных мезаобластей, и, в особенности, краевых зон участков жесткой маски, а также эрозии поверхности диэлектрического материала (SiO_2) в области отдельных изолирующих канавок, в том числе в области, не зависящей от линейных размеров канавок эрозии, обусловленной "статическим" химическим травлением диэлектрического материала (SiO_2) в рабочей технологической среде и гидродинамическими эффектами его полировки (Hydroplaning) [14]. Явления эрозии поверхностей жесткой маски над мезаобластями и диэлектрика в области изолирующих канавок характерны для участков поверхности кристалла с высокой плотностью топологических элементов (транзисторных мезаобластей и изолирующих канавок), имеющих малые линейные размеры в плане, а также участков, содержащих отдельные малоразмерные топологические элементы.
- ♦ Минимизация и, в предельном случае, исключение повреждения поверхности диэлектрического материала (SiO_2), заполняющего объем изолирующих канавок, в результате проведения планаризации поверхности указанных канавок (в том числе предотвращение появления на поверхности слоя SiO_2 в области канавок дефектов типа микроскопических царапин) [16].
- ♦ Достижение, по окончании процесса ХМП и последующей химической обработки поверхности подложек, минимальной степени загрязнения инородными материалами (в том числе микрочастицами) поверхности подложек со структурами, содержащими изолирующие канавки, заполненные планаризованным слоем диэлектрика [17, 18, 19].
- ♦ Исключение повреждения кремния в транзисторных мезаобластях в процессе планаризации поверхности изолирующих канавок.

В табл. 4 обобщены требования к процессу ХМП диэлектрического слоя, заполняющего объем изолирующих канавок, при использовании тех-

Требования к технологическому процессу химико-механической полировки (ХМП) в технологии STI

Параметр качества технологического процесса	Требования к технологическому процессу	Пути достижения заданных требований
Селективность полировки SiO_2 (диэлектрик, заполняющий объем изолирующей канавки) относительно Si_3N_4 (жесткая маска)	Не менее (15–20):1 (в конкретных случаях требуется не менее 100:1)	Выбор оптимального состава полировальной суспензии, материала полировальной подушки и режима обработки подложек
Эффект образования "вогнутого" с плавными краями микрорельефа на поверхности заполненных диэлектриком изолирующих канавок (Dishing-эффект)	Глубина обусловленного Dishing-эффектом микрорельефа поверхности изолирующих областей не более 100 нм при ширине канавок от единиц до сотен микрометров (целесообразно достижение глубины микрорельефа не более 20 нм)	Выбор оптимального материала, жесткости и структуры полировальной подушки. Контроль размера абразивных частиц полировальной суспензии и гидродинамических условий процесса полировки. Выбор оптимального режима процесса полировки (в первую очередь — усилия прижатия подушки к поверхности полировального стола). Использование новых видов расходных материалов (в том числе безабразивных суспензий, применяемых в сочетании с полировальными подушками, содержащими связанные частицы абразивного материала). Использование для процесса ХМП технологического оборудования новой конструкции
Эрозия жесткой маски (Si_3N_4) над транзисторными мезаобластями	Достижение минимальной степени проявления эффекта	Обработка подложек в режиме высокой селективности полировки SiO_2 по отношению к Si_3N_4 . Выбор оптимального материала жесткости и структуры полировальной подушки
Эрозия поверхности диэлектрического материала в области изолирующих канавок, обусловленная его "статическим" химическим травлением в рабочей технологической среде и гидродинамическими эффектами процесса полировки	Достижение минимальной степени проявления эффектов	Выбор оптимального химического состава полировальной суспензии. Использование методов и технических средств для контроля точки окончания процесса полировки и своевременное прекращение обработки подложек

нологии STI и указаны потенциальные пути достижения заданных требований.

Один из возможных подходов к достижению высокой селективности ХМП SiO_2 по отношению к Si_3N_4 заключается в выборе материалов суспензии, полировальной подушки и режимов обработки, обеспечивающих пороговый характер зависимости скорости удаления материала жесткой маски (Si_3N_4) от удельного усилия прижатия (P) обрабатываемой поверхности подушки к полировальной подушке (рис. 2). В общем случае скорости удале-

ния диэлектрического материала (как SiO_2 , так и Si_3N_4) описываются модифицированным уравнением Престона [20]. При $P \leq P_{\text{пор}}$ могут быть достигнуты предельно высокие значения селективности полировки K_c слоя SiO_2 относительно слоя Si_3N_4 (рис. 2).

На рис. 3 (см. вторую сторону обложки) представлена микрофотография узла межэлементной изоляции СБИС с изолирующими канавками, заполненными диэлектрическим материалом, по окончании процесса глобальной планаризации поверхности структуры методом ХМП.

Выводы

Важнейшими направлениями конструкторско-технологических разработок по интеграции технологии формирования узла межэлементной изоляции с помощью мелких канавок (STI) в маршруты изготовления СБИС субмикронного уровня следует считать разработку технологических процессов:

- прецизионного реактивного ионного травления диэлектрических слоев и кремния в плазме высокой плотности (HDP RIF);
- низкотемпературного осаждения диэлектрических слоев в плазме высокой плотности (HDP CVD), обеспечивающих возможность надежного заполнения осаждаемым материалом узких малоразмерных зазоров в топологическом рельефе поверхности структур СБИС, характери-

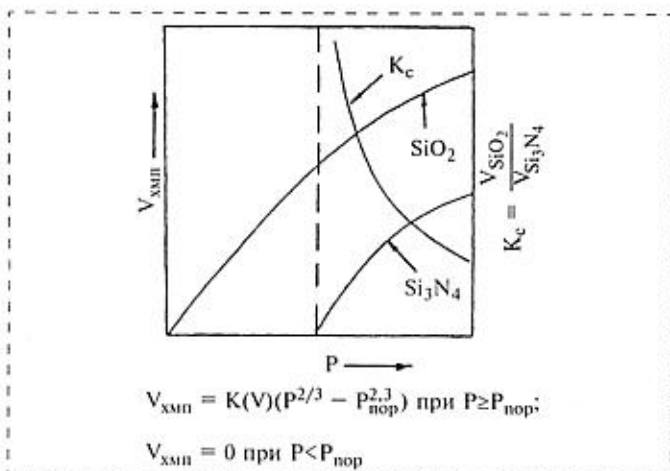


Рис. 2. К вопросу о выборе технологического режима процесса ХМП, обеспечивающего наивысшую селективность полировки SiO_2 относительно Si_3N_4

зующихся высокими значениями геометрического параметра Aspect Ratio;

- прецизионной химико-механической полировки для глобальной планаризации поверхности диэлектрических слоев.

Список литературы

1. Van Cleemput P. et al. HDPCVD Films Enabling Shallow Trench Isolation // Semiconductor International. V. 20. 1997, July. P. 179.
2. Perera A. H. et al. Trench Isolation at 300 nm Active Pitch using X-Ray Lithography // J. Vac. Sci. and Technol., B. V. 14. 1996, November/December. P. 4314.
3. Shiozawa K. et al. Excellent Electrical Characteristics of Ultrafine Trench Isolation // J. Electrochem. Soc. V. 145. 1998, May. P. 1684.
4. Патент США № 5.448.102, МКИ⁶ H 01 L 21/76, 1994. Cane Stephen J. et al. Trench Isolation Stress Relief.
5. Nguyen S. V. High-Density Plasma Chemical Vapor Deposition of Silicon-Based Dielectric Films for Integrated Circuits // IBM J. Res. Develop. V. 43. 1999. N 1/2 (January/March). P. 109.
6. Lee S. H. et al. Shallow Trench Isolation Characteristics with High-Density-Plasma Chemical Vapor Deposition Gap-Fill for Deep-Submicron CMOS Technologies // Jap. J. Appl. Phys., Pt. 1. V. 37. 1998, March. P. 1222.
7. Патент США № 5.923.991, МПК⁶ H 01 L 21/76, 1996. Bronner Gary Bela et al. Methods to Prevent Divot Formation in Shallow Trench Isolation Regions.
8. Schramm D. et al. Tracking STI using an Advanced Optical Metrology Algorithm. Micro. V. 18. 2000, October. P. 55.
9. Патент США № 5.930.644, МПК⁶ H 01 L 21/76, 1997. Tsai Chia-Shiung et al. Method of Forming a Shallow Trench Isolation using Oxide Slope Etching.
10. Boyd J. M. et al. Near-Global Planarization of Oxide-Filled Shallow Trenches using Chemical Mechanical Polishing // J. Electrochem. Soc. V. 143. 1996, November. P. 3718.
11. Stine B. E. et al. Rapid Characterization and Modeling of Pattern-Dependent Variation in Chemical Mechanical Polishing // IEEE Trans. Semiconductor Manuf. V. 11. 1998, February. P. 129.
12. Boyd J. M. et al. A One-Step Shallow Trench Global Planarization Process using Chemical Mechanical Polishing // J. Electrochem. Soc. V. 144. 1997, May. P. 1838.
13. Патент США № 5.516.625, МКИ⁶ G 03 F 7/26, 1993. McNamara Jeanne M. et al. Fill and Etchback Process using Dual Photoresist Sacrificial Layer and Two-Step Etching Process for Planarizing Oxide-Filled Shallow Trench Structure.
14. Smekalin K. CMP Dishing Effects in Shallow Trench Isolation // Solid State Technology. V. 40. 1997, July. P. 187.
15. Патент США № 5.930.646, МПК⁶ H 01 L 21/76, 1998. Gerung Henry et al. Method of Shallow Trench Isolation.
16. Peters L. Investigating the Causes of CMP Micro-Scratches // Semiconductor International. V. 22. 1999, June. P. 70.
17. Tardif F. et al. Cleaning after Silicon Oxide CMP // Microelectron. Eng. V. 37-8. 1997, November. P. 285.
18. Liu C. W. et al. Post Cleaning of Chemical Mechanical Polishing Process // Appl. Surf. Sci. V. 92. 1996, February. P. 176.
19. Lester M. A. Researchers Develop Non-Contact Technique for Cleaning Wafers // Semiconductor International. V. 22. 1999, September. P. 52.
20. Editor's Article. New Model Could Vastly Improve CMP Processes // Semiconductor International. V. 22. 1999, May. P. 21.

УДК 621.3

В. П. Бокарев, канд. хим. наук,
АООТ "НИИМЭ" и завод "Микрон"

РАЗМЕРНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ В НАНОТЕХНОЛОГИИ

На примерах изменения координационного числа атомов в кристаллах и температуры плавления кристалла рассмотрено влияние размера на физико-химические свойства нанокристаллов.

К настоящему времени большое развитие получили разнообразные способы создания наноструктур и закрепления их на разнообразных поверхностях. Уже сейчас нанопленки применяются при создании действующих нанотранзисторов [1]. Вместе с тем для использования таких структур в науке и технике необходимо знание их физических и физико-химических свойств. Невозможность применения "зонной теории" для описания свойств наноструктур и сложности с экспериментальным измерением физико-химических свойств таких объек-

тов привели к различным моделям оценки их свойств. Так, в работе [2] теоретически рассчитаны прочностные характеристики нанопластинок и нанобрусков Si и Al в зависимости от размера. Показано, что при размерах 20–50 Å отличие прочностных характеристик наноструктур от тех же свойств при макроразмерах превышает 10 %. Авторы работы [3] отмечают, что термическая стабильность наноструктур обеспечивается при их линейных размерах, больших 10 нм.

Целью данной работы являлась оценка зависимостей температуры

плавления наноструктур и среднего координационного числа атомов в кристаллических наноструктурах от их линейных размеров.

Ранее нами была показана связь между линейными размерами кристаллических игл, пленок и частиц и средним координационным числом (КЧ) атомов в таких объектах. Были выведены формулы, связывающие КЧ с линейными размерами различных наноструктур [4–6]. Из выведенных формул следует, что наибольшее изменение КЧ наблюдается у свободных нанокристаллов, а наименьшие — у эпитаксиальных нанопленок.

КЧ характеризует не только тип кристаллической структуры, но и характер химических связей между атомами в структуре. В кристаллах элементарных веществ максимальные значения КЧ характерны для металлов, а минимальные — для диэлектриков, причем многие металлы (Cu,

зующихся высокими значениями геометрического параметра Aspect Ratio;

- прецизионной химико-механической полировки для глобальной планаризации поверхности диэлектрических слоев.

Список литературы

1. Van Cleemput P. et al. HDPCVD Films Enabling Shallow Trench Isolation // Semiconductor International. V. 20. 1997, July. P. 179.
2. Perera A. H. et al. Trench Isolation at 300 nm Active Pitch using X-Ray Lithography // J. Vac. Sci. and Technol., B. V. 14. 1996, November/December. P. 4314.
3. Shiozawa K. et al. Excellent Electrical Characteristics of Ultrafine Trench Isolation // J. Electrochem. Soc. V. 145. 1998, May. P. 1684.
4. Патент США № 5.448.102, МКИ⁶ H 01 L 21/76, 1994. Cane Stephen J. et al. Trench Isolation Stress Relief.
5. Nguyen S. V. High-Density Plasma Chemical Vapor Deposition of Silicon-Based Dielectric Films for Integrated Circuits // IBM J. Res. Develop. V. 43. 1999. N 1/2 (January/March). P. 109.
6. Lee S. H. et al. Shallow Trench Isolation Characteristics with High-Density-Plasma Chemical Vapor Deposition Gap-Fill for Deep-Submicron CMOS Technologies // Jap. J. Appl. Phys., Pt. 1. V. 37. 1998, March. P. 1222.
7. Патент США № 5.923.991, МПК⁶ H 01 L 21/76, 1996. Bronner Gary Bela et al. Methods to Prevent Divot Formation in Shallow Trench Isolation Regions.
8. Schramm D. et al. Tracking STI using an Advanced Optical Metrology Algorithm. Micro. V. 18. 2000, October. P. 55.
9. Патент США № 5.930.644, МПК⁶ H 01 L 21/76, 1997. Tsai Chia-Shiung et al. Method of Forming a Shallow Trench Isolation using Oxide Slope Etching.
10. Boyd J. M. et al. Near-Global Planarization of Oxide-Filled Shallow Trenches using Chemical Mechanical Polishing // J. Electrochem. Soc. V. 143. 1996, November. P. 3718.
11. Stine B. E. et al. Rapid Characterization and Modeling of Pattern-Dependent Variation in Chemical Mechanical Polishing // IEEE Trans. Semiconductor Manuf. V. 11. 1998, February. P. 129.
12. Boyd J. M. et al. A One-Step Shallow Trench Global Planarization Process using Chemical Mechanical Polishing // J. Electrochem. Soc. V. 144. 1997, May. P. 1838.
13. Патент США № 5.516.625, МКИ⁶ G 03 F 7/26, 1993. McNamara Jeanne M. et al. Fill and Etchback Process using Dual Photoresist Sacrificial Layer and Two-Step Etching Process for Planarizing Oxide-Filled Shallow Trench Structure.
14. Smekalin K. CMP Dishing Effects in Shallow Trench Isolation // Solid State Technology. V. 40. 1997, July. P. 187.
15. Патент США № 5.930.646, МПК⁶ H 01 L 21/76, 1998. Gerung Henry et al. Method of Shallow Trench Isolation.
16. Peters L. Investigating the Causes of CMP Micro-Scratches // Semiconductor International. V. 22. 1999, June. P. 70.
17. Tardif F. et al. Cleaning after Silicon Oxide CMP // Microelectron. Eng. V. 37-8. 1997, November. P. 285.
18. Liu C. W. et al. Post Cleaning of Chemical Mechanical Polishing Process // Appl. Surf. Sci. V. 92. 1996, February. P. 176.
19. Lester M. A. Researchers Develop Non-Contact Technique for Cleaning Wafers // Semiconductor International. V. 22. 1999, September. P. 52.
20. Editor's Article. New Model Could Vastly Improve CMP Processes // Semiconductor International. V. 22. 1999, May. P. 21.

УДК 621.3

В. П. Бокарев, канд. хим. наук,
АООТ "НИИМЭ" и завод "Микрон"

РАЗМЕРНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ В НАНОТЕХНОЛОГИИ

На примерах изменения координационного числа атомов в кристаллах и температуры плавления кристалла рассмотрено влияние размера на физико-химические свойства нанокристаллов.

К настоящему времени большое развитие получили разнообразные способы создания наноструктур и закрепления их на разнообразных поверхностях. Уже сейчас нанопленки применяются при создании действующих нанотранзисторов [1]. Вместе с тем для использования таких структур в науке и технике необходимо знание их физических и физико-химических свойств. Невозможность применения "зонной теории" для описания свойств наноструктур и сложности с экспериментальным измерением физико-химических свойств таких объек-

тов привели к различным моделям оценки их свойств. Так, в работе [2] теоретически рассчитаны прочностные характеристики нанопластинок и нанобрусков Si и Al в зависимости от размера. Показано, что при размерах 20–50 Å отличие прочностных характеристик наноструктур от тех же свойств при макроразмерах превышает 10 %. Авторы работы [3] отмечают, что термическая стабильность наноустройств обеспечивается при их линейных размерах, больших 10 нм.

Целью данной работы являлась оценка зависимостей температуры

плавления наноструктур и среднего координационного числа атомов в кристаллических наноструктурах от их линейных размеров.

Ранее нами была показана связь между линейными размерами кристаллических игл, пленок и частиц и средним координационным числом (КЧ) атомов в таких объектах. Были выведены формулы, связывающие КЧ с линейными размерами различных наноструктур [4–6]. Из выведенных формул следует, что наибольшее изменение КЧ наблюдается у свободных нанокристаллов, а наименьшие — у эпитаксиальных нанопленок.

КЧ характеризует не только тип кристаллической структуры, но и характер химических связей между атомами в структуре. В кристаллах элементарных веществ максимальные значения КЧ характерны для металлов, а минимальные — для диэлектриков, причем многие металлы (Cu,

Ag, Au, Al и др.) имеют КЧ = 12. Такие металлы, как Ta, W, имеют КЧ = 8. В отдельных бинарных и более сложных сплавах КЧ больше по атомному радиусу металла может достигать до 16. Вместе с тем типичные диэлектрики (кристаллические водород, азот и кислород) имеют КЧ = 1, а у типичных полупроводников с алмазной структурой (Si, Ge) КЧ = 4.

КЧ атомов в кристаллах может измениться под воздействием различных физических факторов. Так, при воздействии высокого давления на химические вещества происходят фазовые превращения, сопровождающиеся увеличением КЧ и уменьшением электрического сопротивления. Теоретические расчеты показывают, что в области сверхвысоких давлений диэлектрики переходят в металлическое состояние [7]. Таким образом, изменение КЧ атомов в кристаллах приводит к изменению их физико-химических и электрических свойств. Так как при переходе к наноразмерам происходит значительное изменение КЧ, то такие изменения неизбежно отразятся на физико-химических свойствах нанобъектов.

Оценим изменение КЧ у монокристаллических пленок Al, Cu и W при уменьшении их толщины до наноразмера. Для простоты примем, что изменение КЧ в нанопленках этих металлов вызывается только увеличением отношения числа поверхностных атомов к числу объемных, а КЧ на границе пленки с подложкой равно объемному. Тогда изменение КЧ в нанопленках можно оценить по формулам [6]:

для Al и Cu

$$\text{КЧ}(100) = (108n + 40):(9n + 5); \quad (1)$$

для W

$$\text{КЧ}(100) = (40n + 16):(5n + 4), \quad (2)$$

где $n = h/a$ — отношение толщины h нанопленки к параметру a элементарной ячейки кристалла.

Подобные оценки можно провести и для нанодорожек W, Al и Cu в предположении того, что значение КЧ на границе с подложкой, как и в предыдущих случаях, равно объемному:

$$\text{КЧ}(W) = [16lmn + 4(nm + n + m - l + 1)]:[lmn + (n + 1) \times (m + 1)(l + 1)]; \quad (3)$$

$$\text{КЧ}(Al, Cu) = 8[6lmn + lm + ln + 2mn + n + m + 1]:[4lmn + 2(lm + ln + mn) + l + m + n + 1], \quad (4)$$

где l, m — отношение соответственно длины и ширины нанодорожки к параметру элементарной ячейки.

Проведенные расчеты показывают, что в области размеров, близких к размеру элементарной кристаллической ячейки, происходит резкое изменение КЧ атомов, а значит, и физико-химических свойств данных металлов.

Ранее было показано, что уменьшение линейных размеров кристалла приводит к уменьшению его температуры плавления. Была выведена формула, связывающая температуру плавления монокристалла кубической формы с его линейным размером [8].

Аналогичную формулу можно вывести и для пленок. Рассмотрим монокристаллическую пленку толщиной h , нанесенную на произвольную поверхность. В соответствии с [8] переход такой кристаллической пленки в расплавленное состояние начнется при температуре, соответствующей соотношению

$$\int_{T_a}^{T_{пл}} c_p dt = kS \sum \sigma_{hkl}, \quad (5)$$

где $T_{пл}$ — температура плавления данного вещества; T_a — температура плавления пленки толщиной h ; c_p — теплоемкость данного вещества; S — площадь поверхности пленки; $\sum \sigma_{hkl}$ — суммарная удельная поверхностная энергия пленки с кристаллографической ориентацией (hkl) ; k — мольный

коэффициент, равный отношению мольного объема к объему пленки: $k = V_m/V_n$ ($V_m = M/\rho$, M — молекулярный вес; ρ — плотность данного вещества; $V_n = S \times h$).

Подставляя данные параметры в формулу (5) и преобразуя ее, мы получаем формулу для расчета температуры плавления пленки, имеющей толщину h :

$$T_a = T_{пл} - M \sum \sigma_{hkl} / (hc_p). \quad (6)$$

Проведенные по формуле (6) расчеты показывают, что наиболее резкое уменьшение температуры плавления монокристаллических пленок происходит при их толщине, сопоставимой с размером элементарной кристаллической ячейки.

На рис. 1, 2 представлены зависимости КЧ и температуры плавления от толщины пленок.

Отметим, что при наноразмерах характер изменения температуры плавления и характер изменения КЧ подобны. В обоих случаях при размерах, близких к параметру элементарной ячейки кристалла, происходит резкое уменьшение температуры плавления и КЧ. Данные эффекты ограничивают применение нанобъектов с размерами, близкими к размеру элементарных кристаллических ячеек данных веществ, из-за неустойчивости их свойств. Что же касается объектов типа монокристаллических дорожек, закрепленных на поверхности, то, как это видно из формул (3), (4), (6), они должны обладать индивидуальными свойствами, не имеющими ничего общего с объемными свойствами данного кристаллического вещества. Например, для типичных металлов такой дорожке будет соответствовать КЧ = 2, что характерно для типичных диэлектриков и, согласно расчетам, будет находиться в расплавленном состоянии при любой температуре. Понятно, что для таких объектов металлические свойства становятся не характерными. Однако нельзя исключить и того, что

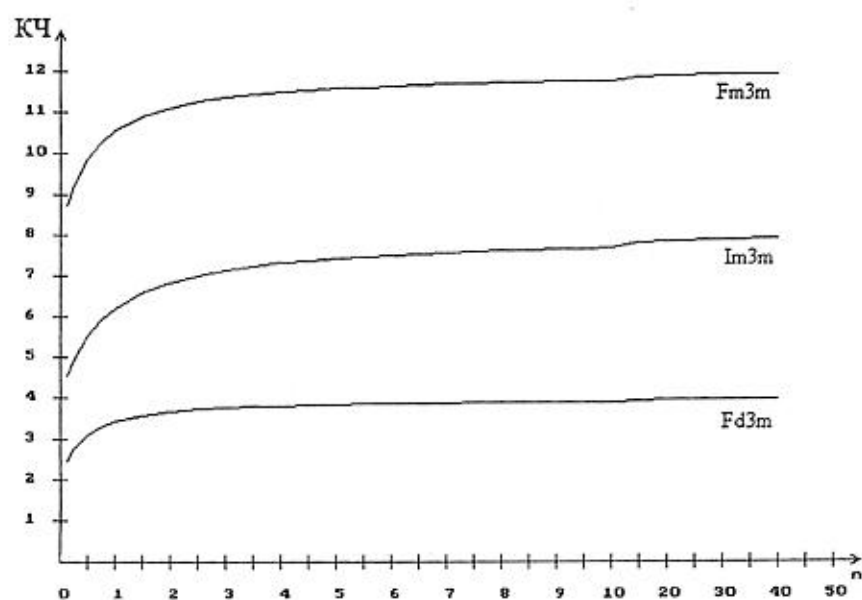


Рис. 1. Зависимость КЧ от отношения толщины к параметру элементарной ячейки для эпитаксиальных пленок с различной кристаллической структурой: с кубической гранецентрированной решеткой (Fm3m), объемно-центрированной (Im3m) и алмазной (Fd3m)

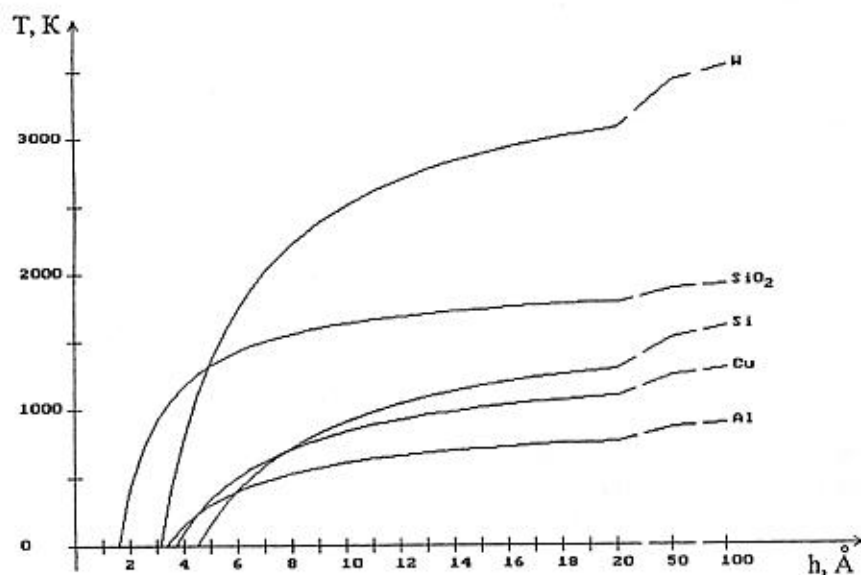


Рис. 2. Зависимость температуры плавления от толщины пленок

при благоприятном окружении моноатомных дорожек атомами подложки либо иной фазы возможно проявление в них эффекта высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП). В частности, такое координационное окружение атомами кислорода и других элементов представляется возможным создавать вокруг медных моноатомных дорожек, приближая его к координационному окружению меди в типичных ВТСП-структурах. Но в этом случае мы будем иметь дело уже не с моноатомными цепочками, а с более сложными многослойными нанобъектами.

Список литературы

1. Richter S., Cachon D., Cohen S. R., Gartsman K., Lyakhovitskaya V., Nanassen V. // *Appl. Phys. Lett.* 1998. V. 73. P. 1868.
2. Miller R. E., Shenoy V. B. // *Nanotechnology*. 2000. V. 11. N 3. P. 139–147.
3. Dryakhlushin V. F., Klimov A. Yu., Rogov V. V., Shashkin V. I., Suchodoev L. V., Volgunov D. G., Vostokov N. V. // *Nanotechnology*. 2000. V. 11. N 3. P. 188–191.
4. Бокарев В. П. Геометрическая оценка координационных чисел атома в дефектных кристаллах неорганических веществ // *Известия АН СССР. Неорганические материалы*. 1986. Т. 22. № 2. С. 347–348.
5. Бокарев В. П., Вахрушев М. Ю. Об изменении свойств кристаллических элементов кремниевой матрицы в результате субмикронной и нанометровой технологии // *Микроэлектроника*. 1992. Т. 21. № 3. С. 66–68.
6. Бокарев В. П., Горисв Е. С. Трехмерные, двумерные и одномерные нанокристаллы. Размерная зависимость свойств // *Сб. трудов Юбилейной 2-й научно-технической конференции АОТ "НИИМЭ и Микрон"*. М.: МИКРОН-ПРИНТ, 1999. С. 66–68.
7. Бацанов С. С. Экспериментальные основы структурной химии. М.: Изд-во стандартов, 1986. 240 с.
8. Бацанов С. С., Бокарев В. П. О пределе дробления кристаллов неорганических веществ // *Известия АН СССР. Неорганические материалы*. 1980. Т. 16. № 9. С. 1650–1652.
9. Бокарев В. П. Поверхностная энергия и плавление кристаллов // *Труды Межведомственного Совета по комплексным проблемам физики, химии и биологии при Президиуме РАН. М. — Екатеринбург*, 1995. С. 67–68.

УДК 621.382; 539.29; 539.211; 539.211

А. В. Зверев, И. Г. Неизвестный, чл.-корр. РАН,
Н. Л. Шварц, канд. физ.-мат. наук,
З. Ш. Яновицкая, канд. физ.-мат. наук,
Институт физики полупроводников СО РАН

ФОРМИРОВАНИЕ СПЛОШНОГО СЛОЯ В ПРОЦЕССЕ ГОМОЭПИТАКСИИ НА ПОРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТИ (111) КРЕМНИЯ (МОДЕЛИРОВАНИЕ)*

Исследовался процесс зарастания пор при молекулярно-лучевой эпитаксии на поверхности Si(111) с помощью трехмерной модели Монте-Карло. Получены зависимости минимальной дозы вещества, необходимой для полного зарастания пор, от плотности и размеров пор при разных температурах и скоростях осаждения. Исследовалась форма захороненных пор в зависимости от характеристик пористой поверхности и условий роста. При низких скоростях осаждения наблюдалась огранка стенок пор высокосоиндексными плоскостями.

Введение

Пористый кремний (ПК) после открытия эффективной фотолюминесценции на этом материале остается привлекательным объектом для применения в оптоэлектронике. Кроме того, ПК является перспективным материалом для создания структур кремний на изоляторе (КНИ) [1], а использование ПК в качестве податливых подложек при гетероэпитаксиальном росте [2–3] открывает новые возможности для снижения уровня механических напряжений при выращивании структур с размерными несоответствиями решеток.

Осажденная доза кремния, необходимая для полного зарастания пористой поверхности, является важным параметром для начала гетероэпитаксиального роста. Практически единственным методом контроля in situ качества растущей поверхности является дифракция быстрых электронов на отражение (ДБЭО). Появление ДБЭО-рефлексов поверхностных сверхструктур связывают с образованием сплошной пленки

на пористой подложке [4], однако такие рефлексы свидетельствуют лишь о появлении структурно-совершенных фрагментов поверхности, которые вполне могут сосуществовать с участками, содержащими открытые поры. Оценка минимально необходимой дозы для полного затягивания пор в зависимости от условий роста и характера пористой поверхности является актуальной задачей. Моделирование может оказать существенную помощь при изучении этого вопроса. Первые результаты по моделированию гомоэпитаксиального роста на пористой поверхности Si(111) были получены ранее [5, 6]. Однако эти работы скорее демонстрировали возможности трехмерных моделей и не содержали систематических исследований процесса зарастания пор.

Моделирование и обсуждение результатов

Было проведено моделирование процесса зарастания пор при эпитаксии Si/Si(111) с помощью трехмерной модели Монте-Карло [6, 7]. Определялась критическая доза N_c , т. е. минимальное число осажденных бислоев (БС), необходимое для полного зарастания пор. Цилиндрические поры одинакового размера, перпендикулярные плоскости (111), равно-

мерно располагались на исходной поверхности, поток осаждаемых атомов также предполагался перпендикулярным поверхности. Параметры пористой подложки варьировались в следующих пределах: пористость $13\% \leq P_s \leq 64\%$, диаметр пор $d = 3,5\text{--}15$ нм в соответствии с экспериментальными работами [2, 4]. Температура подложки в большинстве расчетов составляла 800°C , как в [4]. Скорость осаждения задавалась через универсальный параметр $n_{\text{dif}} = D/V$, где D — коэффициент диффузии, V — скорость осаждения. Расчеты проводились в широком диапазоне значений $n_{\text{dif}} = 10\text{--}10^6$. Связать величину n_{dif} с реальной скоростью осаждения при заданной температуре можно, если известна энергия активации диффузионного скачка на Si(111):

$$V = v \exp[-E_d(kT)]/n_{\text{dif}},$$

где V — скорость осаждения (БС/с); $v = kT/h$ — частота колебаний (1/с); k — постоянная Больцмана; T — температура подложки (К); h — постоянная Планка; E_d — энергия активации поверхностной диффузии (эВ).

В настоящее время для Si(111) значения E_d приводятся различными авторами в довольно широком диапазоне (0,75–1,9 эВ) [8–9], поэтому мы использовали значение $E_d = 1,75$ эВ, полученное нами по результатам модельных исследований плотности зарождения двумерных островков на гладкой поверхности Si(111) [7]. С этим значением E_d для $T = 1073$ К и $n_{\text{dif}} = 10^5$ получаем $V = 1$ БС/с.

На рис. 1 представлена зависимость критической дозы N_c от поверхностной пористости подложки и диаметра пор. Независимость N_c от пористости P_s при высокой скорости осаждения связана с малой диффузионной длиной адатомов. В этом случае материал, идущий на затягивание поры, собирается из узкой области вокруг этой поры, а адатомы с остальной площади образуют островки нового слоя между порами. Зависимость от пористости может проявиться при больших

*Данная работа проведена при поддержке РФФИ (проект 99-02-16742), программы ФЦНТ "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и технологии гражданского направления".

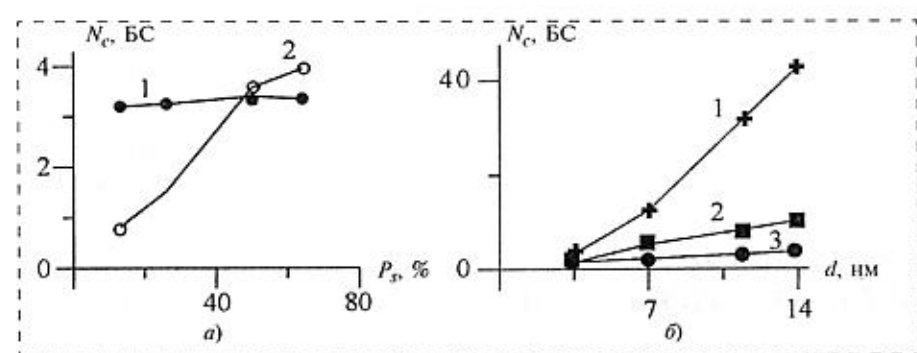


Рис. 1. Зависимость критической дозы N_c при $T = 800$ °C: а — от поверхностной пористости подложки P_s при диаметре поры $d = 3,6$ нм (1 — $V = 10^4$ БС/с; 2 — $V = 1$ БС/с); б — от размеров d пор для $P_s = 26$ % (1 — $V = 10^4$ БС/с; 2 — $V = 10^2$ БС/с; 3 — $V = 1$ БС/с)

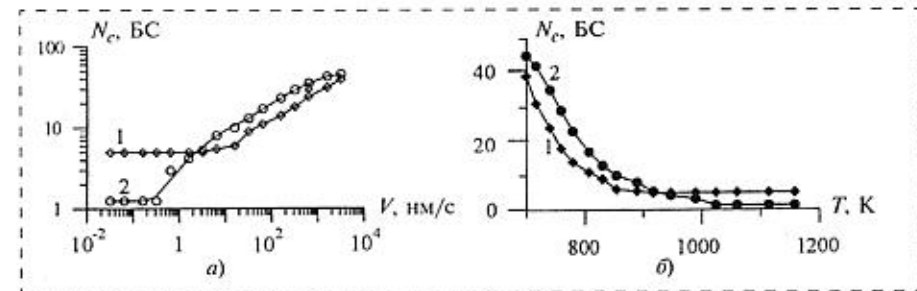


Рис. 2. Зависимость N_c : а — от V при $T = 800$ °C; б — от T при $V = 0,25$ БС/с; $d = 14$ нм; 1 — $P_s = 13$ %; 2 — $P_s = 50$ %

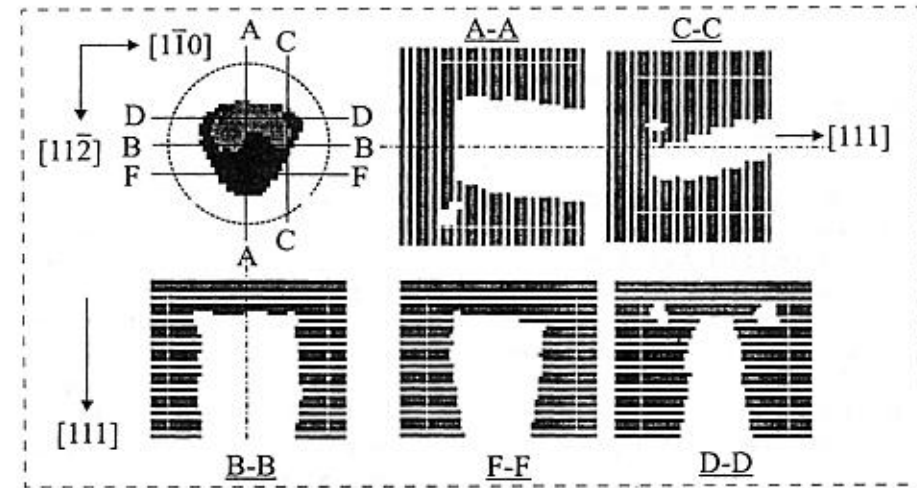


Рис. 3. Пора глубиной $h_0 = 20$ БС с $d = 14$ нм после осаждения 7 БС: вид сверху и сечения, перпендикулярные поверхности (111); $T = 800$ °C, $V = 1$ БС/с, $P_s = 50$ %. Обозначенная штриховой линией окружность и белые линии в сечениях соответствуютначальному размеру пор

значениях P_s , когда зоны питания пор перекрываются. Зависимости N_c от диаметра пор при всех скоростях роста практически линейны, что можно легко объяснить следующим. Количество вещества M_p , идущее на зарастивание поры, равно количеству вещества M_s , собираемо-

го из области рядом с порой, ограниченной либо диффузионной длиной адатомов, либо средним расстоянием между порами:

$$M_p \approx \pi r^2 h; \\ M_s \approx N 2 \pi r L,$$

где r — радиус поры; h — глубина, на которую зарастает пора; N —

число осажденных слоев; L — характеристическая длина. Отсюда следует, что $N_c \sim r$.

Зависимость критической дозы от скорости осаждения вещества при 800 °C представлена на рис. 2, а. При малых скоростях осаждения N_c не зависит от потока, так как все упавшие на поверхность атомы поглощаются порами и N_c лимитируется осажденной дозой. При этом N_c растет с увеличением пористости из-за уменьшения площади сбора адатомов и увеличения заполняемого объема пор. С уменьшением длины диффузии адатомов при росте V уменьшается область питания каждой поры, что приводит к увеличению N_c . Изменением диффузионной длины объясняются и температурные зависимости N_c на рис 2, б.

На начальной стадии заполнения пор наблюдалась огранка пор тремя парами плоскостей типа (117), симметричными относительно оси третьего порядка. На рис. 3 представлены одна из пор диаметром 40 атомных мест (примерно 14 нм) и ее сечения разными плоскостями, перпендикулярными поверхности (111) после осаждения семи слоев.

Рис. 4 иллюстрирует формы зарастающей поры при трех скоростях осаждения и кинетику процесса зарастания мелких пор. При малых скоростях осаждения (рис. 4, а) на начальных стадиях зарастание происходит за счет постепенного сужения поры практически по всей глубине, определяемой большой диффузионной длиной адатомов. При уменьшении диаметра поры до определенного размера вблизи "горлышка" формируется конус.

Иная картина наблюдается при большой скорости осаждения (рис. 4, в). В этом случае перемещение атомов по стенкам пор практически отсутствует, и атомы из потока образуют новые атомные слои между порами. В этих слоях над порами сохраняются пустоты, хотя их размеры уменьшаются по мере нарастания новых слоев. Таким образом, над

исходной порой формируется конический купол. При таком механизме зарастания скорость зарастания не зависит от глубины пор, но зависит от их диаметра (см. рис. 1, б). На рис. 4 видно, что для больших пор форма дна становится выпуклой вследствие попадания атомов из потока непосредственно на дно. При средних скоростях осаждения (рис. 4, б) атомы с поверхности не достигают дна поры, при этом N_c перестает зависеть от глубины пор. Вставка к рис. 4, б демонстрирует кинетику зарастания поры. Видно, что на начальной стадии зарастания формируется "горлышко", диаметр которого уменьшается практически одинаково на всей глубине "горлышка". При достижении некоторого критического диаметра порядка 3 нм форма верхней части "горлышка" приобретает коническую форму.

Зависимость критической дозы от пористости для пор диаметра 14 нм представлена на рис. 5, а. Для больших скоростей осаждения (кривая 1) уменьшение N_c с ростом пористости связано с увеличением суммарной площади зон питания пор с одновременным уменьшением плотности зарождающихся островков между порами. Глубина проникновения адатомов внутрь поры зависит от интенсивности потока вещества, стекающего по ее стенкам. Пористость поверхности и диаметр пор влияют на плотность потока частиц, попадающих на боковые стенки поверхности пор. Связь диффузионной длины адатомов с плотностью потока при движении по боковым стенкам описывается тем же законом, что и при движении по фронтальной поверхности растущего кристалла. Необходимо отметить, что диффузионная длина адатомов по боковым стенкам, ограниченная поверхностями типа (117), оказывается меньше их диффузионной длины по плоскости (111), что связано с числом разрываемых связей при диффузионном скачке. Для пор с глубиной, большей диффузионной длины адатомов

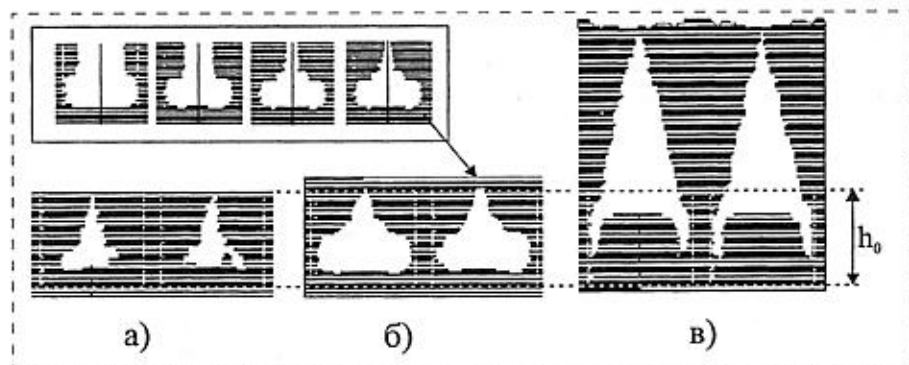


Рис. 4. Сечения поверхности после осаждения:

а — 9,5 БС при $V = 1$ БС/с; б — 10 БС при $V = 10^2$ БС/с; в — 37,5 БС при $V = 10^4$ БС/с; $T = 800$ °C; $P_s = 50$ %; $d = 14$ нм; $h_0 = 20$ БС. На вставке — сечения поры (б) после осаждения 4, 7, 8 и 9 БС

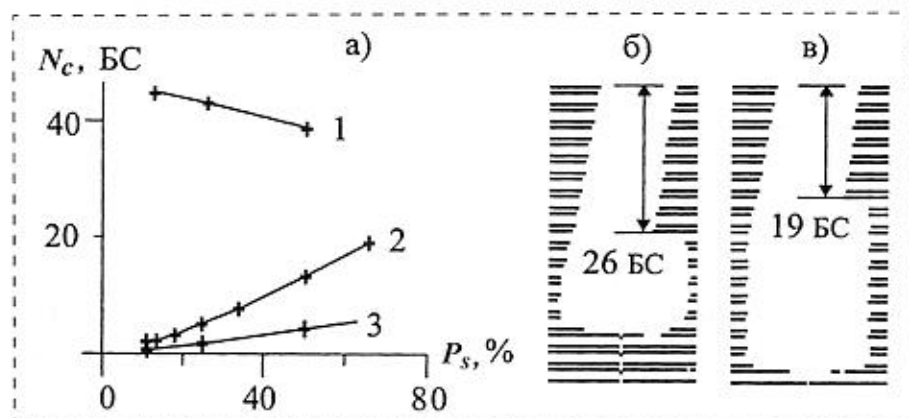


Рис. 5. Зарастание пор большого диаметра ($d = 14$ нм, $T = 800$ °C):

а — зависимость N_c от P_s ($V = 10^4$ БС/с для всех h_0 ; 2 — $V = 10^{-1}$ БС/с; $h_0 = 100$ БС; 3 — $V = 10^{-1}$ БС/с; $h_0 = 20$ БС); б — сечение пор при $P_s = 13$ % после осаждения 1,8 БС; в — сечение пор при $P_s = 50$ % после осаждения 15 БС ($d = 14$ нм, $h_0 = 100$ БС, $V = 10^{-1}$ БС/с, $T = 800$ °C)

на плоскости (117), зарастание будет идти несколько медленнее, чем для мелких пор, где вещество с поверхности доходит до дна. Кривые 2 и 3 (рис. 5, а) иллюстрируют зависимость N_c от пористости при малых скоростях осаждения для мелких и глубоких пор.

На рис. 5, б—в приведены сечения глубоких пор по линии А—А (см. рис. 3). Сечения получены для пор исходно равных размеров на поверхностях с различной пористостью: $P_s = 13$ % (рис. 5, б) и $P_s = 50$ % (рис. 5, в) после осаждения дозы вещества, достаточной для формирования "горлышка" поры. На этих рисунках хорошо видно, что максимальная глубина проникновения адатомов в поры увеличивается с ростом пористости. Отметим, что диффу-

зионная длина на поверхности (117), определенная по глубине проникновения атомов в поры, на порядок меньше диффузионной длины адатомов на поверхности (111), найденной из плотности зарождения островков на гладкой поверхности при заданной скорости осаждения и температуре.

В отличие от упрощенной модельной картины реальные поры имеют более сложную, часто древовидную форму. Как показали предварительные результаты вычислительных экспериментов по эпитаксии на поверхности с разветвленными порами, сложная форма пор слабо сказывается на оценке критической дозы.

Сравнение значения N_c , полученного при моделировании, с

экспериментальными результатами работы [4] при одинаковых условиях роста показало, что экспериментальное значение критической дозы $N_c = 6 \div 8$ нм больше расчетного значения $N_c = 1 \div 2$ нм. Такое различие может быть вызвано, по крайней мере, двумя причинами. Во-первых, реальная пористая поверхность вряд ли является идеально гладкой плоскостью (111), содержащей отверстия. Рельеф на поверхности означает наличие дополнительных стоков для адсорбированных атомов и уменьшение их потока в поры, что приведет к увеличению N_c . Во-вторых, расхождение результатов можно объяснить неточным знанием энергии активации диффузионного скачка по поверхности Si(111). Увеличение энергии активации с 1,75 до 1,87 эВ повысит модельное значение N_c до значения, полученного экспериментально. Заметим, что часто используемое значение $E_d = 1,3$ эВ [10] привело бы к еще меньшим

значениям N_c для любых реальных условий роста.

Заключение

С помощью моделирования проведено систематическое исследование процесса зарастания пор на поверхности Si(111) в зависимости от режимов гомоэпитаксиального роста и от исходных параметров пористой подложки. Полученные оценки минимальной осажденной дозы, требуемой для полного зарастания всех пор на поверхности, сравнивались с данными экспериментальных работ для ряда параметров роста. Заниженное модельное значение критической дозы может быть связано как с неточным знанием энергии активации поверхностной диффузии, так и с неидеальностью реальной пористой поверхности. Однако можно надеяться, что зависимости критической дозы от параметров роста и пористости подложки правильно отражают реальный процесс зарастания пор.

Список литературы

1. Romanov S. I., Dvurechenskii A. V., Kirienko V. V., Grotzshel R., Gutakovskii A., Sokolov L. V., Lamin M. A. // Proceeding of NATO Advanced Research Workshop, Perspectives, Science and Technologies for Novel Silicon on Insulator Devices / ed. Hemment P. L. F. et al. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. 2000. P. 29–46.
2. Romanov S. I., Mashanov V. I., Sokolov L. V., Gutakovskii A., Pchelyakov O. P. // Appl. Phys. Lett., 1999. V. 75. P. 4118–4120.
3. Hayashi Y., Agata Y., Soga T., Jimbo T., Umeno M., Sato N., Yonehara T. // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. V. 37. P2. N11B. P. L1354–L1357.
4. Yasumatsu Y., Ito T., Nishizawa H., Hiraki A. // Appl. Surf. Sci. 1991. V. 48/49. P. 414–418.
5. Новиков П. Л., Александров Л. Н., Двуреченский А. В., Зиновьев В. А. // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. С. 512–517.
6. Зверев А. В., Неизвестный И. Г., Шварц Н. Л., Яновская З. Ш. // Микроэлектроника. 1999. Т. 28. С. 377–384.
7. Зверев А. В., Неизвестный И. Г., Шварц Н. Л., Яновская З. Ш. // Известия АН. Сер. физическая. 2000. Т. 63. В. 2. С. 356–362.
8. Voigtlander B., Zinner A., Weber T., Bonzel H. P. Phys. Rev. B. 1995. V. 51. 12. P. 7583–7591.
9. Larsson M. I., Hansson G. V. // Surf. Sci. Lett. 1994. V. 321. N 3. P. 1261–1266.
10. Latyshev A. V., Krasilnikov A. B., Aseev A. L. // Thin Solid Films. 1996. V. 281–282. P. 20–23.

УДК 621.3:66.02

Е. Н. Пятыхев, М. С. Лурье, И. В. Попова, А. Н. Казакин,
Санкт-Петербургский Государственный
Технический Университет,
Лаборатория микротехнологий
и микроэлектромеханических систем
(e-mail: pen@mtmems.hop.stu.neva.ru)

СПЕЦИФИКА ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Рассматриваются особенности и различия технологии микроэлектромеханических и микроэлектронных систем. Показаны недостаточность средств микроэлектроники для решения проблем микроэлектромеханических систем и необходимость создания новых базовых технологий на примере технологии изготовления вибрационного микромеханического гироскопа.

Успехи микроэлектроники, во многом определившие современный технологический уровень цивилизации, берут свое начало примерно в 50–

60-х годах XX века. За истекшие десятилетия микроэлектронной технологией найден путь от гибридных сборок, содержащих единичные полупроводниковые вентили, до СБИС, где число транзисторов на чипе давно превысило миллион. Такой стремительный рост возможностей вычислительного ядра автоматических систем управления привел к тому, что дальнейшее наращивание этой подсистемы уже не приводит к адекватному увеличению возможностей системы управления в целом, ибо слабейшими звеньями цепи оказываются сенсорная и активаторная подсистемы. Поэтому следующий качественный прогресс техники неизбежно связан с прогрессом сенсорных и активаторных подсистем, вначале на базе дискретных микроэлектромеханических элементов, функционально и технологически совместимых с вычислительной подсистемой, а затем и путем полного слияния всех трех подсистем в едином триадном микроустройстве [1, 2].

Несмотря на то, что период работы в области микроэлектромеханических преобразователей насчитывает полтора-два десятилетия, состояние

экспериментальными результатами работы [4] при одинаковых условиях роста показало, что экспериментальное значение критической дозы $N_c = 6 \div 8$ нм больше расчетного значения $N_c = 1 \div 2$ нм. Такое различие может быть вызвано, по крайней мере, двумя причинами. Во-первых, реальная пористая поверхность вряд ли является идеально гладкой плоскостью (111), содержащей отверстия. Рельеф на поверхности означает наличие дополнительных стоков для адсорбированных атомов и уменьшение их потока в поры, что приведет к увеличению N_c . Во-вторых, расхождение результатов можно объяснить неточным знанием энергии активации диффузионного скачка по поверхности Si(111). Увеличение энергии активации с 1,75 до 1,87 эВ повысит модельное значение N_c до значения, полученного экспериментально. Заметим, что часто используемое значение $E_d = 1,3$ эВ [10] привело бы к еще меньшим

значениям N_c для любых реальных условий роста.

Заключение

С помощью моделирования проведено систематическое исследование процесса зарастания пор на поверхности Si(111) в зависимости от режимов гомоэпитаксиального роста и от исходных параметров пористой подложки. Полученные оценки минимальной осажденной дозы, требуемой для полного зарастания всех пор на поверхности, сравнивались с данными экспериментальных работ для ряда параметров роста. Заниженное модельное значение критической дозы может быть связано как с неточным знанием энергии активации поверхностной диффузии, так и с неидеальностью реальной пористой поверхности. Однако можно надеяться, что зависимости критической дозы от параметров роста и пористости подложки правильно отражают реальный процесс зарастания пор.

Список литературы

1. Romanov S. I., Dvurechenskii A. V., Kirienko V. V., Grotzshel R., Gutakovskii A., Sokolov L. V., Lamin M. A. // Proceeding of NATO Advanced Research Workshop, Perspectives, Science and Technologies for Novel Silicon on Insulator Devices / ed. Hemment P. L. F. et al. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands. 2000. P. 29–46.
2. Romanov S. I., Mashanov V. I., Sokolov L. V., Gutakovskii A., Pchelyakov O. P. // Appl. Phys. Lett., 1999. V. 75. P. 4118–4120.
3. Hayashi Y., Agata Y., Soga T., Jimbo T., Umeno M., Sato N., Yonehara T. // Jpn. J. Appl. Phys. 1998. V. 37. P2. N11B. P. L1354–L1357.
4. Yasumatsu Y., Ito T., Nishizawa H., Hiraki A. // Appl. Surf. Sci. 1991. V. 48/49. P. 414–418.
5. Новиков П. Л., Александров Л. Н., Двуреченский А. В., Зиновьев В. А. // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. С. 512–517.
6. Зверев А. В., Неизвестный И. Г., Шварц Н. Л., Яновская З. Ш. // Микроэлектроника. 1999. Т. 28. С. 377–384.
7. Зверев А. В., Неизвестный И. Г., Шварц Н. Л., Яновская З. Ш. // Известия АН. Сер. физическая. 2000. Т. 63. В. 2. С. 356–362.
8. Voigtlander B., Zinner A., Weber T., Bonzel H. P. Phys. Rev. B. 1995. V. 51. 12. P. 7583–7591.
9. Larsson M. I., Hansson G. V. // Surf. Sci. Lett. 1994. V. 321. N 3. P. 1261–1266.
10. Latyshev A. V., Krasilnikov A. B., Aseev A. L. // Thin Solid Films. 1996. V. 281–282. P. 20–23.

УДК 621.3:66.02

Е. Н. Пятыхев, М. С. Лурье, И. В. Попова, А. Н. Казакин,
Санкт-Петербургский Государственный
Технический Университет,
Лаборатория микротехнологий
и микроэлектромеханических систем
(e-mail: pen@mtmems.hop.stu.neva.ru)

СПЕЦИФИКА ТЕХНОЛОГИИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Рассматриваются особенности и различия технологии микроэлектромеханических и микроэлектронных систем. Показаны недостаточность средств микроэлектроники для решения проблем микроэлектромеханических систем и необходимость создания новых базовых технологий на примере технологии изготовления вибрационного микромеханического гироскопа.

Успехи микроэлектроники, во многом определившие современный технологический уровень цивилизации, берут свое начало примерно в 50–

60-х годах XX века. За истекшие десятилетия микроэлектронной технологией найден путь от гибридных сборок, содержащих единичные полупроводниковые вентили, до СБИС, где число транзисторов на чипе давно превысило миллион. Такой стремительный рост возможностей вычислительного ядра автоматических систем управления привел к тому, что дальнейшее наращивание этой подсистемы уже не приводит к адекватному увеличению возможностей системы управления в целом, ибо слабейшими звеньями цепи оказываются сенсорная и активаторная подсистемы. Поэтому следующий качественный прогресс техники неизбежно связан с прогрессом сенсорных и активаторных подсистем, вначале на базе дискретных микроэлектромеханических элементов, функционально и технологически совместимых с вычислительной подсистемой, а затем и путем полного слияния всех трех подсистем в едином триадном микроустройстве [1, 2].

Несмотря на то, что период работы в области микроэлектромеханических преобразователей насчитывает полтора-два десятилетия, состояние

технологии в этой области существенно отличается от состояния микроэлектронных (МЭ) технологий.

В области МЭ-технологий давно уже сформировался набор классических технологических маршрутов и стандартных операций, и дальнейшее развитие технологии идет по пути постепенных эволюционных усовершенствований этих операций и маршрутов. Относительная традиционность и унифицированность МЭ-технологий стала возможной потому, что вычислительные средства, по существу, изолированы от внешнего мира и инвариантны предметным областям их использования.

Иначе обстоит дело с микроэлектромеханическими системами (МЭМС), которые непосредственно контактируют со "средой обитания" регулируемого объекта и для которых предметная область диктует определяющие правила конструирования изделия.

По этой причине для технологии создания МЭМС недостаточно даже того богатого наследия, которое может предоставить микроэлектронное производство. Лишь сравнительно малое число МЭМС-конструкций может быть целиком реализовано на базе стандартных для микроэлектроники операций. В качестве примеров относительно несложных конструкций МЭМС можно привести некоторые типы измерителей давления, акселерометров и разработанные в СПбГТУ диффузионные натекатели гелия. Нестандартными для МЭ-технологий в этих разработках являются только операции корпусирования, что вообще характерно для МЭМС, и формирование кремниевых и оксидных мембран. Для более сложных устройств различие в технологиях МЭМС и МЭ соответственно увеличиваются.

Специфическими отличиями МЭМС являются следующие:

- микроэлектронные изделия статичны и практически двумерны, МЭМС — реальные трехмерные конструкции с подвижными элементами;
- в микроэлектронике используется главным образом кремний (или другие полупроводниковые монокристаллы), в технологии МЭМС принципиально необходимо применение также ряда других конструкционных материалов: стекол, ситаллов, полимеров, металлов;
- в связи со сказанным выше необходимо решение сопутствующих задач неподвижного и подвижного сочленения разнородных материалов с помощью однотипных технологических приемов;
- различная "объемность" изделий. Если планарный слой СБИС, в котором формируются все (даже "многоэтажные") схемные элементы, не превышает примерно 1 мкм, то для МЭМС-структур характерна высота "деталей" — от 10 до 100 мкм и более;
- совершенно новой проблемой является сохранение нужных механических характеристик в

тонких отделенных слоях материалов, поверхности которых формируются в различных технологических условиях, а содержание примесей зачастую неоднородно по толщине.

Рассмотрим подробнее эти специфические особенности на примере конкретной достаточно сложной по способу реализации технологической разработки *вибрационных микрогироскопов*. Работа выполнялась лабораторией микротехнологий и микроэлектромеханических систем СПбГТУ совместно с АОЗТ "Гирооптика" и являлась исходной стадией создания бесплатформенных навигационных приборов. Анализ различных вариантов конструкций вибрационных гироскопов, проведенный сотрудниками АОЗТ "Гирооптика", позволил выбрать оптимальную по ряду соображений конструкцию, базовая модель которой схематически представлена на рис. 1 [3].

Базовая модель состоит из двух сочлененных разнородных деталей: токопроводящего кремниевого вибратора с электростатическим приводом и изолирующего основания с элементами контактирования, токоразводки и измерительных конденсаторов. Колебания в противофазе двух инерционных масс вибратора, подвешенных на упругих торсионах, возбуждаются электростатическим приводом на частоте механического резонанса системы. При повороте гироскопа вокруг оси чувствительности силы Кориолиса отклоняют массы в вертикальном направлении, вследствие чего модулируются емкости измерительных конденсаторов. Измеренный сигнал пропорционален угловой скорости поворота гироскопа.

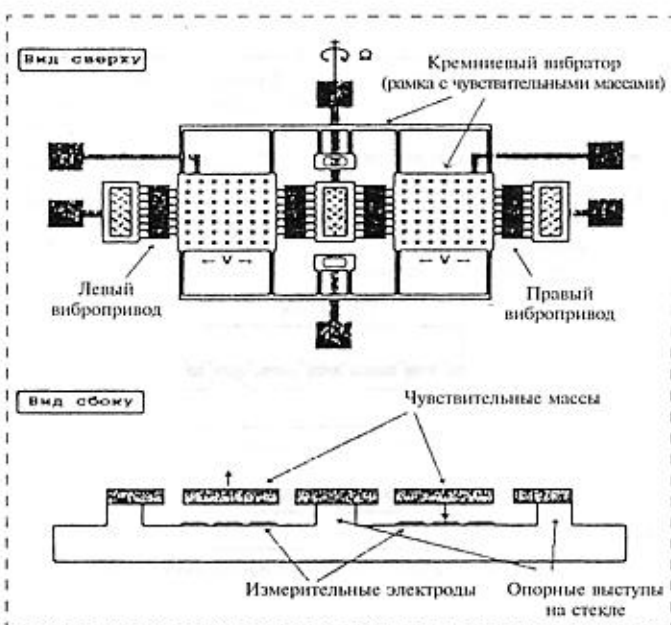


Рис. 1. Схема вибрационного микрогироскопа

Технологический маршрут изготовления гироскопов содержит три блока взаимосогласованных операций (рис. 2):

- формирование вибраторов;
- формирование оснований;
- сборка этих деталей.

Согласно исходному постулату микротехнологий [2], все операции должны проводиться групповым методом, т. е. одновременной обработкой нескольких или одной пластины с большим числом чипов.

Создание в кремниевой заготовке (пластине) глубокого рельефа будущего вибратора относится к ключевым задачам изготовления гироскопа. Принципиально эта задача решается традиционным для микроэлектроники методом плазменного анизотропного травления. Однако главные проблемы возникают в связи с тем, что необходимая глубина травления измеряется десятками микрометров, а отклонение боковых стенок от вертикали не должно превышать единиц градусов (в противном случае при работе привода возникают паразитные модуляции сигнала). Эти проблемы вынуждают искать новые решения следующих вопросов:

- состав и режимы плазмы;
- маскирование кремния;
- особенности конструкции реакционной камеры.

Как правило, эти решения компромиссны. Например, предпочтительная по анизотропности хлорсодержащая плазма уступает фторсодержащей по предельной износостойкости маскирующего слоя, а желательное (из-за большой глубины трав-

ления) ускорение процесса может сопровождаться ухудшением анизотропии. Таким образом, стандартная для МЭ-технологии операция фактически превращается в самостоятельную технологическую разработку. Следует отметить, однако, что результат такой разработки становится, в свою очередь, базовым для целого ряда МЭМС.

Второй блок операций — формирование изолирующего основания — наиболее близок к стандартным процессам вакуумного напыления, фотолитографии и химического травления. Специфичны здесь выбор материала основания и связанное с этим нахождение оптимальных составов травителя и маскирующего слоя. Выбор материала определяется требованиями третьего (сборочного) блока операций. Для рассматриваемого проекта наилучшими материалами основания конструкции являются боронатриевосиликатные стекла группы "Пирекс", термический коэффициент расширения (ТКР) которых наиболее близок к ТКР кремния. Расчет высоты опорных выступов на стекле, к которым крепятся неподвижные части кремниевой структуры, показал, что их оптимальное значение находится в диапазоне 6—10 мкм. Разработанный состав кислотного травителя потребовал применения молибденового маскирующего слоя, технология формирования которого обычна для МЭ-технологий.

Третий блок операций не имеет прямых аналогов в стандартных МЭ-технологиях. Ядром его являются операции соединения кремниевой и стеклянной пластин и удаление балластного кремния (отделение структурированного слоя от остального массива кремниевой пластины).

Наиболее прочное и надежное сцепление кремния со стеклом, как известно, может быть получено методом электротермокомпрессионной сварки. Разработки, проводимые лабораторией микротехнологий СПбГТУ, подтверждают, что данная операция должна стать одной из универсальных сборочных операций МЭМС для весьма различных групп материалов. При этом для ряда конкретных случаев может потребоваться не только корректировка режимов, но и нанесение промежуточных пленочных слоев, обеспечивающих диффузионное взаимодействие. Для реализации групповой электротермокомпрессионной сварки "деталей" гироскопа потребовалось создание специальных технологических средств, так как близкие по назначению установки микроэлектронного производства имеют иные характеристики.

Удаление балластного кремния, вопреки кажущейся тривиальности задачи, оказалось одним из сложнейших элементов технологического маршрута, потребовавшим корректировки многих других операций. Принципиально здесь могли рассматриваться два противоположных подхода:

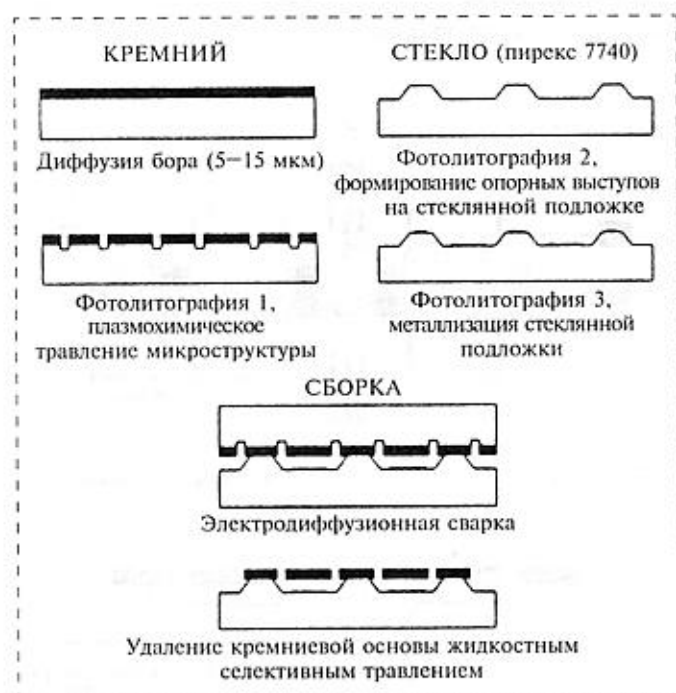


Рис. 2. Технология изготовления микромеханического гироскопа

- непосредственное травление тыльной стороны кремниевой пластины до вскрытия структурированных участков или до "стоп-слоя" (области с инверсной электропроводностью), формируемого в первом блоке операций;
- вытравливание жертвенного слоя пористого кремния, сформированного под структурированным слоем перед сваркой пластин, после чего балластный массив кремния отделяется от сборки.

Для нахождения приемлемого решения пришлось достаточно подробно изучить оба указанных подхода.

Чтобы дать представление об объеме проведенных исследований, укажем, что в ходе их было сделано следующее:

- разработан ряд новых селективных травителей;
- изучены концентрационные, температурные и временные характеристики процессов;
- разработана специальная система селективного плазмохимического дотравливания (с изменением конструкции камеры ПХТ);
- исследовано влияние на процессы исходной концентрации примесей в кремнии;
- проведена корректировка фотошаблонов, не затрагивающая геометрию рабочих элементов гироскопа, но обеспечивающая баланс скоростей травления на различных фрагментах структуры и т. п.

После отделения балластной массы кремния в изготовленном гироскопе начинает проявляться проблема сохранения нужных механических харак-

теристик в тонких отделенных слоях материалов. Остаточные напряжения, вызванные неполным соответствием ТКР стекла и кремния, градиентом примеси в кремнии и различной предисторией поверхностей вибратора, приводят к некоторому изгибу отделенной кремниевой структуры. Этот изгиб может при неблагоприятных условиях создать недопустимое расхождение подвижных и неподвижных гребенок электростатического привода. Комплексная физическая природа явления обуславливает и необходимость комплексных мероприятий по его устранению.

Рассмотренный пример наглядно показывает, насколько технология микроэлектромеханических систем может отличаться от стандартных приемов микроэлектронной технологии. Фактически эта новая фаза микротехнологий давно уже превратилась в самостоятельную отрасль, которая требует и новых технических подходов, и новых материалов, и нового технологического оснащения.

Список литературы

1. Spillman W. B., Sirkis J. S., Gardiner P. T. The field of smart structures as seen by those working in it: survey results, http://www.spic.org/web/woring_groups/smart_structures/Survey.html
2. Пятыхев Е. Н., Лурье М. С. Микротехнологии и микроэлектромеханические системы — новое научно-техническое направление // Научно-технический вестник СПбГУ. 1999. № 3. С. 101—112.
3. Лестьев А. М., Попова И. В., Лурье М. С., Пятыхев Е. Н., Семенов А. А., Евстифеев М. И. Разработка и исследование микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 1999. № 2(26).

В МИРЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ПАМЯТЬ

Компьютерные "мозги" — это полупроводниковый чип. Прогресс за последние 35 лет в процессе создания более быстрых миниатюрных и дешевых компьютеров — не больше, чем игра на размерах, позволяющая разместить еще больше транзисторов и других электронных устройств на кремниевой подложке, размером с почтовую марку. Сегодняшние ПК содержат до 10 млн. транзисторов на чипе, каждый транзистор — несколько сотен нанометров. Но продолжать эту миниатюризацию будет не так уж просто и дешево!..

В интегральной схеме, использующей органические молекулы (размером несколько нанометров), могут содержаться до триллиона электронных устройств, что позволяет создать крошечный суперкомпьютер или память с плотностью записи, в миллион раз превышающей современные полу-

проводниковые кристаллы. Уже сейчас некоторыми ведущими промышленными и научными лабораториями получены элементарные устройства на основе "молекулярной электроники".

Устройство памяти состоит из совокупности переплетенных между собой нанопроводов, напоминающих "бутерброд" из молекулярных слоев. Напряжение изменяет электронное состояние молекул и, следовательно, сопротивление между верхним и нижним проводами. Одно напряжение уменьшает электрическое сопротивление через молекулы, переключая прибор в позицию "включено", другим напряжением молекулы переводятся в режим "отключено".

Некоторые группы исследователей уже получили патенты, связанные с наноэлектронными технологиями. Остальные же патенты на устройства, использующие молекулярную электронику, находятся в процессе рассмотрения в патентном офисе США.

14/04/01

www.TechnologyReview.com

- непосредственное травление тыльной стороны кремниевой пластины до вскрытия структурированных участков или до "стоп-слоя" (области с инверсной электропроводностью), формируемого в первом блоке операций;
- вытравливание жертвенного слоя пористого кремния, сформированного под структурированным слоем перед сваркой пластин, после чего балластный массив кремния отделяется от сборки.

Для нахождения приемлемого решения пришлось достаточно подробно изучить оба указанных подхода.

Чтобы дать представление об объеме проведенных исследований, укажем, что в ходе их было сделано следующее:

- разработан ряд новых селективных травителей;
- изучены концентрационные, температурные и временные характеристики процессов;
- разработана специальная система селективного плазмохимического дотравливания (с изменением конструкции камеры ПХТ);
- исследовано влияние на процессы исходной концентрации примесей в кремнии;
- проведена корректировка фотошаблонов, не затрагивающая геометрию рабочих элементов гироскопа, но обеспечивающая баланс скоростей травления на различных фрагментах структуры и т. п.

После отделения балластной массы кремния в изготовленном гироскопе начинает проявляться проблема сохранения нужных механических харак-

теристик в тонких отделенных слоях материалов. Остаточные напряжения, вызванные неполным соответствием ТКР стекла и кремния, градиентом примеси в кремнии и различной предисторией поверхностей вибратора, приводят к некоторому изгибу отделенной кремниевой структуры. Этот изгиб может при неблагоприятных условиях создать недопустимое расхождение подвижных и неподвижных гребенок электростатического привода. Комплексная физическая природа явления обуславливает и необходимость комплексных мероприятий по его устранению.

Рассмотренный пример наглядно показывает, насколько технология микроэлектромеханических систем может отличаться от стандартных приемов микроэлектронной технологии. Фактически эта новая фаза микротехнологий давно уже превратилась в самостоятельную отрасль, которая требует и новых технических подходов, и новых материалов, и нового технологического оснащения.

Список литературы

1. Spillman W. B., Sirkis J. S., Gardiner P. T. The field of smart structures as seen by those working in it: survey results, http://www.spic.org/web/woring_groups/smart_structures/Survey.html
2. Пятыхев Е. Н., Лурье М. С. Микротехнологии и микроэлектромеханические системы — новое научно-техническое направление // Научно-технический вестник СПбГУ. 1999. № 3. С. 101—112.
3. Лестьев А. М., Попова И. В., Лурье М. С., Пятыхев Е. Н., Семенов А. А., Евстифеев М. И. Разработка и исследование микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 1999. № 2(26).

В МИРЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ПАМЯТЬ

Компьютерные "мозги" — это полупроводниковый чип. Прогресс за последние 35 лет в процессе создания более быстрых миниатюрных и дешевых компьютеров — не больше, чем игра на размерах, позволяющая разместить еще больше транзисторов и других электронных устройств на кремниевой подложке, размером с почтовую марку. Сегодняшние ПК содержат до 10 млн. транзисторов на чипе, каждый транзистор — несколько сотен нанометров. Но продолжать эту миниатюризацию будет не так уж просто и дешево!..

В интегральной схеме, использующей органические молекулы (размером несколько нанометров), могут содержаться до триллиона электронных устройств, что позволяет создать крошечный суперкомпьютер или память с плотностью записи, в миллион раз превышающей современные полу-

проводниковые кристаллы. Уже сейчас некоторыми ведущими промышленными и научными лабораториями получены элементарные устройства на основе "молекулярной электроники".

Устройство памяти состоит из совокупности переплетенных между собой нанопроводов, напоминающих "бутерброд" из молекулярных слоев. Напряжение изменяет электронное состояние молекул и, следовательно, сопротивление между верхним и нижним проводами. Одно напряжение уменьшает электрическое сопротивление через молекулы, переключая прибор в позицию "включено", другим напряжением молекулы переводятся в режим "отключено".

Некоторые группы исследователей уже получили патенты, связанные с наноэлектронными технологиями. Остальные же патенты на устройства, использующие молекулярную электронику, находятся в процессе рассмотрения в патентном офисе США.

14/04/01

www.TechnologyReview.com

В этом номере мы продолжаем публикацию аннотационных отчетов, полученных в инициативных научных проектах в области математики, информатики, механики, химии и поддержанных РФФИ по итогам конкурса 1997 г. (начало см. в № 1—5, 2001 г.). Данные по исполнителям проектов можно найти в "Информационном бюллетене РФФИ" № 5

АННОТАЦИОННЫЕ ОТЧЕТЫ ПО ТЕМАМ РФФИ

Комплексообразование и динамика молекулярного обмена в эмульсиях

Номер проекта: 97-03-33244-а
Год предоставления отчета: 1997

Проведено экспериментальное изучение процессов комплексообразования органических молекул (спиновых зондов) с циклодекстринами в системах с различной степенью организации (гомогенные водные растворы, эмульсии типа «масло в воде» с одно- и двухкомпонентной дисперсной фазой). Метод определения скорости комплексообразования — электронный парамагнитный резонанс в сочетании с методикой остановленной струи. Обнаружен эффект ускорения процесса комплексообразования при переходе от гомогенных растворов к эмульсиям с однокомпонентной дисперсной фазой. Обнаружено и объяснено влияние термической истории эмульсии с двухкомпонентной дисперсной фазой на скорость комплексообразования.

Роль гидрофобных взаимодействий в процессах полимеризации в водных системах

Номер проекта: 97-03-32785-а
Год предоставления отчета: 1997

В соответствии с планом работы в отчетном периоде исследовано влияние природы растворителя на радикальную полимеризацию акриламида и двух его N-алкилзамещенных. В качестве растворителя использовали смеси воды с тетрагидрофураном различного состава. Установлено, что добавление ТГФ к водному раствору акриламида приводит к постоянному уменьшению скорости полимеризации этого мономера во всем интервале составов растворителя. В то же время кривая зависимости скорости полимеризации N-бутил- и N-октилакриламидов от состава растворителя проходит через максимум, причем максимальная скорость процесса наблюдается при использовании

смесей растворителей, содержащих 35 и 15 мол. % воды соответственно. Анализ этих кинетических результатов, а также полученных в работе ЯМР-спектроскопических и вискозиметрических данных позволил сделать вывод о существенном влиянии гидрофобных взаимодействий, реализующихся в водных системах, на процесс полимеризации изученных мономеров. Полученные результаты оформлены в виде статьи, которая направлена в редакцию журнала "Высокомолекулярные соединения".

Проведены предварительные опыты по "мицеллярной" полимеризации и сополимеризации гидрофобно-модифицированных производных акриламида в водном растворе в присутствии поверхностно-активных веществ. Найдены условия получения полностью растворимых в воде сополимеров акриламида, содержащих различное число звеньев гидрофобно-модифицированных сомономеров. В дальнейшем будет изучено влияние различных факторов на состав и микроструктуру таких полимеров.

В лаборатории разработана методика исследования процессов полимеризации под давлением с использованием спектроскопических методов для регистрации кинетики процесса.

Разработан новый метод синтеза N-алкилзамещенных производных акриламида.

Оптико-электрохимическое исследование механизма образования, морфологии и физико-химических свойств нано- и микроструктур, формируемых на электродах в катодных и анодных процессах

Номер проекта: 97-03-32362-а
Год предоставления отчета: 1997

Разработан новый высокоскоростной лазерный эллипсометр с быстродействием на уровне нескольких наносекунд. Разработана оптическая

многослойная модель границы раздела адсорбционной системы платина—медь. С применением многофункционального лазерного фазомодуляционного эллипсометра проведены исследования начальных стадий электрохимического окисления Cu и сплавов Cu—Ni в хлоридсодержащих электролитах.

Впервые прямо зарегистрирован квазипериодический колебательный процесс растворения-осаждения поверхностного слоя (оксида и гидрокси-хлорида-хлорида меди) на металле в условиях стационарного потенциала, связанный с колебательным поведением скорости растворения металла.

Изучены начальные стадии электрокристаллизации меди на Pt в растворах CuSO_4 методами циклической вольтамперометрии и фотометрической хроноэллипсометрии. Обнаружен неизвестный ранее эффект осцилляции интенсивности отраженного света при растворении осадка Cu, связанный с локальными изменениями степени заполнения поверхности Pt адатомами Cu.

Предложена схема механизма анодного процесса растворения трехмерного осадка и адатомного слоя.

Изучались электронные свойства оксидных пленок на W, Nb и Cu. На оксидах W и Nb во всей

области потенциалов от потенциала формирования до потенциала плоских зон (ППЗ) исследован переход закономерностей изменения с потенциалом фототока и дифференциальной емкости (C) от закономерностей, определяемых наличием области пространственного заряда (ОПЗ) в полупроводнике, к закономерностям, связанным с истощением пленки оксида по носителям тока при высоких потенциалах. С применением метода определения концентрации носителей (N) по глубине пленки по кривой C — E получена кривая изменения концентрации свободных электронов по толщине пленки Nb_2O_5 . Величина N падает с удалением от границы с металлом.

На основании спектральной зависимости фототоков на Cu_2O был сделан вывод о формировании двух ОПЗ с проводимостью p -типа и n -типа соответственно вблизи границы оксид/электролит и оксид/Cu. На осажденных пленках Cu_2O в p -области была определена концентрация свободных дырок $1,2 \cdot 10^{-18} \text{ см}^{-3}$. Обнаружено резкое увеличение ширины запрещенной зоны Cu_2O при понижении толщины слоя Cu_2O от 1,9 эВ при толщине 3 мкм до 3,1 эВ при толщине в несколько нанометров.

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Нанолента — альтернатива нанотрубок

8 марта 2001 г. исследователи из Технологического института Джорджии объявили о создании нового класса наноструктур, который может стать основой для недорогих сверхмалых сенсоров, компонентов плоских дисплеев и других электронных наноустройств. Сделанные на основе полупроводниковых металлических оксидов такие сверхтонкие и плоские структуры — отдельные нанополоски (dubbed "nanobelts") — предоставляют более широкие возможности по сравнению с нанопроводами и углеродными нанотрубками. Лентоподобные нанополоски являются химически более чистыми, однородными по структуре и менее дефектными, с чистой поверхностью, не требующей защиты от окисления. Каждая полоска сделана на основе монокристалла с определенной ориентацией и формой поверхности. Были исследованы нанополоски из оксидов цинка, олова, индия, кадмия и галлия. Эти материалы выбраны в связи с тем, что они являются прозрачными полупроводниковыми оксидами, используемыми при изготовлении современных функциональных и интеллектуальных устройств. Хотя нанополоски и не являются столь же прочными, как нанотрубки, технология их

создания, по уверению авторов, является более контролируемой, что позволит создавать большие количества однородных и бездефектных структур.

Solid state technology, 24 March, 2001

Чувствительная подушечка на руле вместо приборной доски

Новый тип сенсорной системы обратной связи, которая работает на принципе локального растягивания кожи, а не на давлении, предоставили сотрудники Центра интеллектуальных машин в Университете Мак Гилла (Монреаль, Канада). Как пример, они предлагают модифицировать руль автомобиля в чувствительный к прикосновению инструмент, передающий данные с приборной доски водителю непосредственно через кончики пальцев. Основой идеи является более высокая чувствительность кожи к растяжению, нежели к простому давлению. Экспериментальный сенсорный дисплей состоит из планарного массива вертикальных штырьков толщиной 1 мм. Каждый штырек крепится на паре пьезоэлектрических стержней с электродами. Прикладывая напряжение к электродам, можно изгибать пьезоэлектрические стержни, которые сдвигают штырьки на расстояние до 50 мкм в любом направлении. Разработчики продол-

многослойная модель границы раздела адсорбционной системы платина—медь. С применением многофункционального лазерного фазомодуляционного эллипсометра проведены исследования начальных стадий электрохимического окисления Cu и сплавов Cu—Ni в хлоридсодержащих электролитах.

Впервые прямо зарегистрирован квазипериодический колебательный процесс растворения-осаждения поверхностного слоя (оксида и гидрокси-хлорида-хлорида меди) на металле в условиях стационарного потенциала, связанный с колебательным поведением скорости растворения металла.

Изучены начальные стадии электрокристаллизации меди на Pt в растворах CuSO_4 методами циклической вольтамперометрии и фотометрической хроноэллипсометрии. Обнаружен неизвестный ранее эффект осцилляции интенсивности отраженного света при растворении осадка Cu, связанный с локальными изменениями степени заполнения поверхности Pt адатомами Cu.

Предложена схема механизма анодного процесса растворения трехмерного осадка и адатомного слоя.

Изучались электронные свойства оксидных пленок на W, Nb и Cu. На оксидах W и Nb во всей

области потенциалов от потенциала формирования до потенциала плоских зон (ППЗ) исследован переход закономерностей изменения с потенциалом фототока и дифференциальной емкости (C) от закономерностей, определяемых наличием области пространственного заряда (ОПЗ) в полупроводнике, к закономерностям, связанным с истощением пленки оксида по носителям тока при высоких потенциалах. С применением метода определения концентрации носителей (N) по глубине пленки по кривой C — E получена кривая изменения концентрации свободных электронов по толщине пленки Nb_2O_5 . Величина N падает с удалением от границы с металлом.

На основании спектральной зависимости фототоков на Cu_2O был сделан вывод о формировании двух ОПЗ с проводимостью p -типа и n -типа соответственно вблизи границы оксид/электролит и оксид/Cu. На осажденных пленках Cu_2O в p -области была определена концентрация свободных дырок $1,2 \cdot 10^{-18} \text{ см}^{-3}$. Обнаружено резкое увеличение ширины запрещенной зоны Cu_2O при понижении толщины слоя Cu_2O от 1,9 эВ при толщине 3 мкм до 3,1 эВ при толщине в несколько нанометров.

НОВОСТИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Нанолента — альтернатива нанотрубок

8 марта 2001 г. исследователи из Технологического института Джорджии объявили о создании нового класса наноструктур, который может стать основой для недорогих сверхмалых сенсоров, компонентов плоских дисплеев и других электронных наноустройств. Сделанные на основе полупроводниковых металлических оксидов такие сверхтонкие и плоские структуры — отдельные нанополоски (dubbed "nanobelts") — предоставляют более широкие возможности по сравнению с нанопроводами и углеродными нанотрубками. Лентоподобные нанополоски являются химически более чистыми, однородными по структуре и менее дефектными, с чистой поверхностью, не требующей защиты от окисления. Каждая полоска сделана на основе монокристалла с определенной ориентацией и формой поверхности. Были исследованы нанополоски из оксидов цинка, олова, индия, кадмия и галлия. Эти материалы выбраны в связи с тем, что они являются прозрачными полупроводниковыми оксидами, используемыми при изготовлении современных функциональных и интеллектуальных устройств. Хотя нанополоски и не являются столь же прочными, как нанотрубки, технология их

создания, по уверению авторов, является более контролируемой, что позволит создавать большие количества однородных и бездефектных структур.

Solid state technology, 24 March, 2001

Чувствительная подушечка на руле вместо приборной доски

Новый тип сенсорной системы обратной связи, которая работает на принципе локального растягивания кожи, а не на давлении, предоставили сотрудники Центра интеллектуальных машин в Университете Мак Гилла (Монреаль, Канада). Как пример, они предлагают модифицировать руль автомобиля в чувствительный к прикосновению инструмент, передающий данные с приборной доски водителю непосредственно через кончики пальцев. Основой идеи является более высокая чувствительность кожи к растяжению, нежели к простому давлению. Экспериментальный сенсорный дисплей состоит из планарного массива вертикальных штырьков толщиной 1 мм. Каждый штырек крепится на паре пьезоэлектрических стержней с электродами. Прикладывая напряжение к электродам, можно изгибать пьезоэлектрические стержни, которые сдвигают штырьки на расстояние до 50 мкм в любом направлении. Разработчики продол-

жают исследование чувствительности различных текстур, таких как кожа, пластик и бархат, а также влияния формы острия штырьков на чувствительность пользователя.

New Scientist, 10 March 2001

Раскрыт секрет нанопор в золоте

Если поместить сплав золота с серебром в кислоту, серебро быстро растворится. Этот процесс (dealloying) оставляет после себя необычную губкоподобную структуру золота, вся поверхность которой оказывается заполненной атомно-размерными каналами и порами. Вопрос: почему золото принимает странную структуру? — долго был головомолкой для ученых. Исследователи из Университета Джона Хопкинса говорят, что смогли разрешить эту задачу. Основная идея их работы заключается в учете самосогласованного динамического процесса перестройки атомов золота. После вымывания растворенного серебра атомы золота начинают быстро мигрировать, образуя кластеры. В свою очередь, кластеры сливаются в более крупные объединения, что обусловлено уменьшением поверхностной энергии (подобно каплям воды на стекле). Но с увеличением размеров кластеры становятся неподвижными, процесс их объединения и роста замедляется. Этим и объясняется воспроизводимая структура пор и каналов, полученная авторами. Тема данной работы может помочь в понимании и решении проблем коррозии металлов. Вместе с тем этот процесс можно сделать управляемым для создания на основе пористых металлов катализаторов химических реакций. Для увеличения активности золотой поверхности пор их можно покрыть каталитической субстанцией, содержащей, например, ферменты для создания микросенсоров в биомедицинских устройствах. Однако для более детального понимания процесса коррозии авторам следует провести еще ряд исследований с неидеальными характеристиками поверхности.

Nature, 22 March 2001

Холодильник на кристалле

Микроэлектронные и оптоэлектронные ИС часто развивают максимальные скорости в работе, что приводит к их нагреву, значительно уменьшающему время жизни этих устройств. Ученые из University of California (Санта-Барбара, Санта-Круз) предлагают защищать ИС от перегрева, используя маленькие термоэлектрические (ТЭ) охладители, помещенные прямо на чипе. Современные промышленные ТЭ охладители производятся отдельно и затем устанавливаются на микросхемах. Новые микроохладители на основе сверхрешеток выращиваются непосредственно на кремниевой подложке. Это позволяет получить более близкий термический контакт с полупроводниками и упрощает весь технологический процесс.

Благодаря малым размерам (40 мкм) ТЭ охладители могут быть локализованы в месте максимального выделения теплоты. В отличие от устройств, сделанных на основе кремния и германия, новая разработка была получена добавлением углерода в Si/Ge-структуру. Это избавляет от необходимости использования буферных слоев и упрощает процесс производства. Все еще не решена главная проблема современных "микрокуллеров" на основе сверхрешеток, которые охлаждают полупроводниковые поверхности только до 7 °С, что недостаточно для использования в коммерческих приложениях.

Applied Physics Letters, 12 March 2001; text at Physics News Select.

Прогресс в изучении BN-нанотрубок

В то время, когда одни нанотехнологи пытаются улучшить процесс создания углеродных нанотрубок, другие выбирают свой путь. Ученые из Northwestern University (Evanston) объявили о значительном прогрессе в создании и анализе нитрид-боровых (BN) нанотрубок, которые по сравнению с углеродными являются более химически стойкими. Изготавливают BN структуры на поверхности (а не в газовой фазе) и не используют воздушную среду. Атомы бора и активные атомы азота распыляют на чистую подогретую поверхность вольфрама в сверхвысоком вакууме, поддерживая напряжение от 250 до 500 В. Скорость роста BN нанотрубок примерно равна 0,1 нм/с. Полученные электронные фотографии выявили много новых деталей роста нанотрубок и образования дефектов. Сравнивая их со структурной компьютерной моделью, ученые обнаружили 4- и 8-кратную симметрию колец и "крышечек" нанотрубок. Они сделали вывод, что трубки растут с концов, висящих в вакууме, а не прикрепленных к поверхности вольфрама. BN трубки по структуре схожи с углеродными трубками — они все состоят из свернутых слоев гексагональной атомной матрицы. BN нанотрубки имеют более высокую температурную устойчивость и менее подвержены окислению в отличие от углеродных. Их также можно использовать в качестве электронных устройств, так как они являются полупроводниками и более предсказуемы в своих электронных свойствах. Синтезируя BN нанотрубки, исследователи хотели бы больше узнать о том, как они атомно растут и как формируются дефекты.

Phys. Rev. Lett. 86, 2385, 12 March 2001.

И. И. Бобринецкий,

В. К. Неволин, д-р физ.-мат. наук, проф.,

Э. А. Снисаренко,

МИЭТ

E-mail: vk@miee.ru

<http://www.nanoworld.org/russian/tef>