

# ВОЗМОЖНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ НАНОИМПРИНТЛИТОГРАФИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

С. Бобков, Э. Врублевский, В. Киреев, В. Недзвецкий,  
А. Трепалин, И. Томпсон, Г. Дойл, Н. Хуснатдинов,  
Д. Лабрейк

**В**ближайшие 2-3 года следует ожидать создания мини-фабрик (производственных линеек) на базе систем наноимпринтлитографии (НИЛ) для изготовления наноприборов на основе регулярных структур, в которых функциональные характеристики повышаются с уменьшением размеров. К таким приборам относятся: устройства памяти на полупроводниковых, магнитных и фазовых переходах или электронных перестройках молекул полимеров, сенсоры газов и паров на встречно-штыревых структурах, болометры, датчики магнитного поля, приборы на поверхностных акустических волнах (surface acoustic waves – SAW), элементы телекоммуникационной аппаратуры, микро-наноэлектромеханические системы, устройства на гибких подложках (printable electronics), биодатчики (biosensors), позволяющие идентифицировать сложные молекулы (например, ДНК), радиочастотные идентификационные метки (RFID) и т.д.

Уровень технологии (УТ) микроэлектроники определяется возможной топологической нормой, т.е. минимальным размером элемента или зазора в регулярных структурах с минимальным периодом  $L_{\min} = 1/2 \text{ min pitch}$ , который определяется по первому уровню разводки в динамических оперативных запоминающих устройствах (ДОЗУ) (DRAM – dynamic random access memory)  $L_{\min} = \text{DRAM half pitch}$  [1].

Естественно, что минимальный размер элементов в регулярных структурах с зазорами, большими самих элементов или изолированных элементов, расстояние между которыми в 10 и более раз больше их характерных размеров, может быть значительно меньше [1,2]. К таким элементам относятся длины затворов МОП-транзисторов в

высоко совершенных ДОЗУ и микропроцессорах (МП) (MPU – microprocessor unit).

Кроме того, при производстве интегральных микросхем (ИМС) должна обеспечиваться точность совмещения топологии функциональных слоев на пластинах не хуже 30-40% от значения минимального размера элемента [3].

В промышленной технологии микро- и наноэлектроники для формирования микро- и наноструктур используется стратегический подход "сверху вниз" (top-down), т.е. осуществляется локальное удаление ненужных областей функциональных слоев (ФС) заготовки путем их травления. При этом точность воспроизведения размеров элементов структур (разрешение, локальность травления) в горизонтальной

плоскости обеспечивается с помощью резистивных масок, сформированных в процессах литографии [1,3].

Точность воспроизведения размеров структур в вертикальной плоскости обеспечивается точностью воспроизведения и контроля:

- толщин функциональных слоев в процессах осаждения, нанесения, окисления, модификации и полировки на планарных и рельефных поверхностях;
- глубин и профилей в процессах травления;
- глубин и профилей распределения легирующих примесей в процессах ионной имплантации и термического отжига.

В 2000 году мировой консорциум производителей микросхем International SEMATECH Inc. принял решение, что промышленности необходимо два метода литографии: один высокопроизводительный (60-120 пластин/ч) для заводов с массовым производством кристаллов ДОЗУ и МП; другой – менее производительный (15-30 пластин/ч) для мини-фабрик с малыми объемами выпуска заказных и специализированных интегральных микросхем (ИМС) [4].

Направления и перспективы развития литографии в технологии микро- и наноэлектроники, достигнутые и прогнозируемые значения характеристик различных литографических процессов рассмотрены в работах [1-3].

В данной статье проанализированы возможности и особенности наиболее перспективного для изготовления ИМС с нанометровыми размерами элементов процесса S-FIL наноимпринтлитографии (S-FIL НИЛ) с пошаговой штамповкой в жидкий мономер с последующим его отверждением УФ-излучением (step and flash imprint lithography S-FIL процесс).

S-FIL процесс проводится с использованием твердых (на основе пластин кварца) обычно одноуровневых нано-

штампов с площадью штамповки (10x10 мм, 15x15 мм, 26x32 мм и 26x33 мм), перемещаемых по поверхности пластин диаметром до 300 мм, на которых негативный по отношению к получаемому на рабочей пластине топологический рисунок с размерами элементов до 20 нм формируется на одном уровне по высоте в слоях кварца или пленках двуокиси кремния толщиной от 100 до 200 нм [5].

Процесс изготовленияnanoштампа (S-FIL штампа) представлен на рис. 1. Nanoштампы обычно изготавливаются из кварцевой фотошаблонной заготовки размером 152x152x6,35 мм. По базовому варианту на нее осаждается слой хрома толщиной 15 нм, на который наносится пленка высокоразрешающего позитивного электронного резиста, например, ZEP 520A, толщиной 80-100 нм. Пленка электронорезиста экспонируется на самом высокоразрешающем оборудовании (например, Leica UHR) высокоэнергетическим (100 кэВ) электронным пучком диаметром несколько нанометров [6].

После жидкостного проявления и плазменной зачистки (descum) топологического рисунка и меток совмещения в электронорезисте проводится травление пленки хрома и удаление остатков электронорезистивной маски. Хром служит маской для реактивного ионного травления (reactive ion etching – RIE) кварца в газоразрядной плазме на основе хладона-23 (CHF<sub>3</sub>) на глубину 100-200 нм.

Затем слой хрома удаляется в жидкостном травителе с поверхности кварца, и на ней путем травления в растворе плавиковой кислоты через маску формируется пьедестал с заданной площадью и высотой 15 мкм. Площадь пьедестала определяет площадь штамповки. Пьедестал 15x15 мм использовался с системой S-FIL НИЛ Imprio 100 фирмы Molecular Imprints, Inc. Из одной фотошаблонной заготовки

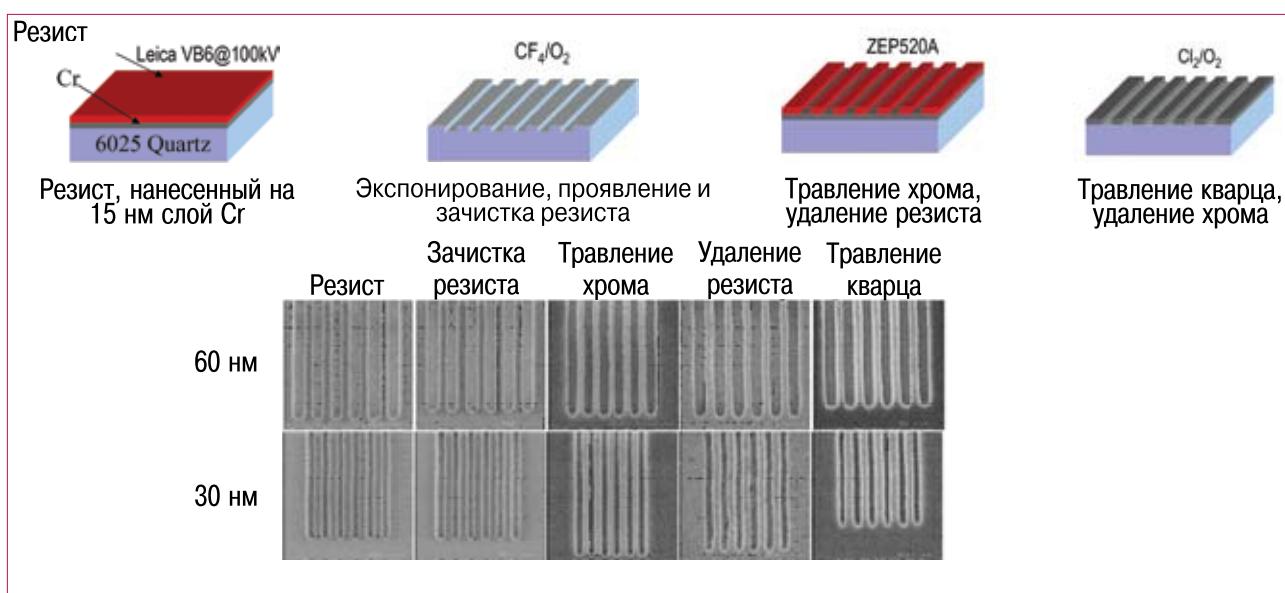


Рис.1. Технологический процесс изготовления nanoштампа

с помощью резки и обработки можно получить 4 наноштампа размером 65x65 мм [6].

Перед штамповкой поверхность наноштампов обрабатывается раствором или аэрозолью аморфных фторполимеров или в разряде фторуглеродов с целью создания на их поверхности сверхтонкой (мономолекулярной) пленки для лучшего отделения наноштампа от материала после штамповки.

Различные варианты процессов S-FIL литографии показаны на рис. 2.

В процессе прямой S-FIL литографии поверхность пластины, как гладкая, так и с ранее созданным топологическим рельефом, предварительно покрывается с помощью центрифуги органическим передаточным слоем (transfer layer) TranSpin [7], который одновременно выполняет адгезионную и планаризирующую функции. Толщина TranSpin-слоя варьируется в зависимости от высоты рельефа на пластине от 1 до 700 нм [6]. В качестве слоя TranSpin могут использоваться слои полимида, органических фоторезистов и антиотражающих покрытий (antireflective coating – ARC).

На область пластины, подвергаемую штамповке, с помощью системы подачи из микросопла системы S-FIL НИЛ наносится SilSpin-слой кремнийсодержащего фотополимеризующего (под действием ультрафиолетового (УФ) излучения (обычно с  $\lambda = 365$  нм) жидкого мономера с низкой вязкостью (<5 сантипуз) [7,8]. SilSpin-слой также называется печатным (imprint) или барьерным к травлению (etch barrier)

слоем, и его исходная толщина варьируется в зависимости от высоты рельефа наноштампа 75-270 нм [6].

Перед штамповкой через прозрачный наноштамп с помощью устройства совмещения системы и набора меток, расположенных на наноштампе и пластине, осуществляется совмещение их топологических рисунков. Системы S-FIL НИЛ фирмы Molecular Imprints Inc. обеспечивают следующие точности совмещения (отклонения 3) топологии на наноштампе и пластине: IMPRIO 55  $\leq 1$  мкм, IMPRIO 100  $\leq 500$  нм, IMPRIO 250 50 нм, IMPRIO 250+  $\leq 20$  нм [9].

После нанесения SilSpin-слоя производится процесс штамповки (впечатывание наноштампа в жидкий мономер), которая осуществляется при комнатной температуре и давлениях ниже 0,07 атмосфер ( $\leq 1$  psi). Затем проводится УФ-облучение жидкого мономера через кварцевый наноштамп с целью его отверждения. При этом объем мономера немного уменьшается, что позволяет легко извлечь наноштамп из затвердевшего печатного слоя [15].

При проведении прямой S-FIL литографии (рис. 2) после штамповки на поверхности пластины в местах выступов топологии наноштампа остается тонкая (15-70 нм) пленка SilSpin-слоя, т.е. остаточный барьерный слой (residual etch barrier) (рис. 2а, прямая S-FIL литография, первый этап). Для ее удаления (зачистки) используется анизотропное реактивное ионное травление (RIE) во фторсодержащей плазме (рис. 2а, прямая S-FIL литография, второй этап).

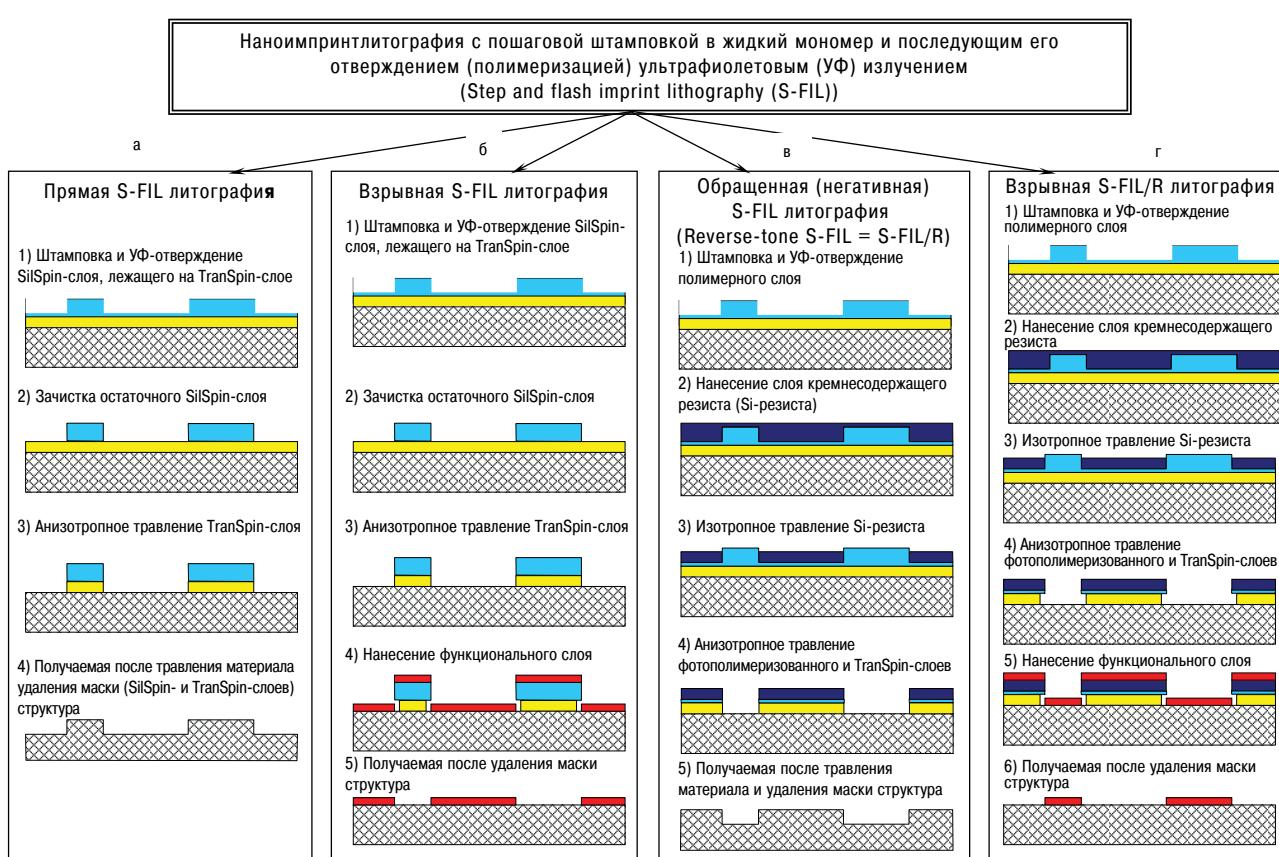


Рис.2. Классификация процессов (S-FIL) наноимпринтлитографии (nanoштамповки)

После зачистки проводится перенос топологического рисунка из печатного (барьерного) слоя в передаточный органический TranSpin-слой путем его анизотропного реактивного ионного травления (RIE) в кислородсодержащей плазме до поверхности подложки или подлежащего функционального слоя (рис. 2а, прямая S-FIL литография, третий этап). При этом SilSpin-слой выступает как маска, стойкая к травлению из-за превращения содержащего в нем кремния в кислородсодержащей плазме в  $\text{SiO}_2$ . Селективность травления барьера SilSpin-слоя к передаточному TranSpin-слою в зависимости от содержания кремния в барьере слое, состава плазмы и режимов травления составляет от 1:3 до 1:10 [5].

После получения маски, состоящей из остатков барьера слоя и целого передаточного TranSpin-слоя, проводится травление (обычно – RIE) функционального слоя и удаление маскирующих SilSpin- и TranSpin-слоев (жидкостное химическое и/или плазмохимическое) (рис. 2а, прямая S-FIL литография, четвертый этап).

В процессе взрывной S-FIL литографии на сформированную маску наносится функциональный слой, который после удаления (взрыва – lift-off) маски остается на немаскированных участках подложки (пластины) (рис. 2б, четвертый этап). Для лучшего удаления (взрыва – lift-off) маски на поверхность пластины перед формированием передаточного TranSpin-слоя обычно наносится специальный легко удаляемый в растворах LOL-слой (lift-off layer – LOL).

При проведении обращенной (негативной – reverse-tone) S-FIL литографии или S-FIL/R литографии в качестве печатного слоя используется жидкий органический фотополимеризующийся мономер без содержания кремния, наносимый на планаризующий TranSpin-слой. В таком мономере проводится процесс печати топологии наноштампа аналогично описанному выше процессу (рис. 2в).

Затем на поверхность этого полимерного слоя с топологическим рисунком с помощью центрифуги наносится слой кремнесодержащего полимера и проводится его изотропное травление (жидкостное химическое или плазмохимическое) до выхода на поверхность границы органического фотополимерного слоя (рис. 2в, второй и третий этапы). После этого проводится анизотропное травление (RIE) в кислородсодержащей плазме фотополимерного и TranSpin-слоев до поверхности подложки или подлежащего функционального слоя, и формируется обращенная (негативная) топология наноштампа маска (рис. 2в, четвертый этап).

После формирования маски в процессе S-FIL/R литографии проводится анизотропное травление (RIE) поверхностного функционального слоя и удаление маски (жидкостное химическое и/или плазмохимическое) (рис. 2в, пятый этап).

В процессе взрывной S-FIL/R литографии на сформированную маску наносится функциональный слой, который

после удаления (взрыва – lift-off) маски остается на немаскированных участках подложки (пластины) (рис. 2г, шестой этап). Для лучшего удаления (взрыва – lift-off) маски на поверхность пластины перед формированием передаточного TranSpin-слоя или вместо него наносится специальный легко удаляемый в растворах LOL-слой.

Обращенная S-FIL/R литография по сравнению с прямой S-FIL литографией позволяет получать более качественный наноразмерный топологический рисунок на непланарных поверхностях пластин в более толстых передаточных TranSpin-слоях, поэтому является лучшим вариантом для создания нанотопологии в функциональных слоях ИМС [10].

S-FIL/R и S-FIL литографии могут быть совмещены со стандартной оптической проекционной фотолитографией для получения топологии на слоях с самыми малыми размерами. Для этого наноштамп (набор наноштампов) совмещается с комплектом фотошаблонов по площади печатаемых на пластине кристаллов и меткам совмещения топологии. В работе [11] приведен технологический процесс изготовления МОП-транзисторов с совмещением операций стандартной фотолитографии и S-FIL литографии на слое формирования затворов транзисторов, причем S-FIL литография позволяла получать длину затвора транзисторов до 30 нм.

Дальнейшие этапы развития фирмой MOLECULAR IMPRINTS INC систем наноимпринтлитографии IMPRIO приведены в таблице.

Таким образом, процессы S-FIL и S-FIL/R литографии, выполняемые на промышленной системе S-FIL НИЛ IMPRIO 250-HVM с автоматической загрузкой пластин и наноштампов, обеспечат возможность изготовления ИМС с размерами элементов вплоть до 16 нм.

Стоимость образцов иммерсионных фотолитографических систем с эксимерными лазерами на ArF ( $\lambda = 193$  нм) и систем на экстремальном (extreme) ультрафиолете (EUV-систем) ( $\lambda = 13,6$  нм) для уровней технологии (УТ) 45-32 нм оценивается от 20 до 40 млн. долл. [1], тогда как стоимость системы IMPRIO 250 будет в 3-6 раз меньше [3,9].

Следовательно, использование двух систем S-FIL IMPRIO 250 для УТ 45-32 нм будет дешевле, чем одной иммерсионной фотолитографической системы, а две S-FIL НИЛ системы смогут обеспечить при обработке 200-мм пластин производительность 8 пластин/ч. Такая производительность недостаточна для завода с запуском 25000 пластин/месяц, но вполне подходит для мини-фабрики с запуском 250 пластин/месяц.

В то же время использование двух систем S-FIL IMPRIO 250<sup>+</sup> позволит обрабатывать 200-мм пластины с производительностью 24 пластины/ч, что соразмерно с потребностями завода с запуском 10000-12000 пластин/месяц.

Кроме того, фирма Molecular Imprints Inc. намеревается увеличить в ближайшие три года производительность про-

мышленных систем IMPRIO-HVM до 20 пластин/ч для 300-мм пластин и до 49 пластин/ч для 200-мм пластин (табл.).

### Развитие фирмой Molecular Imprints Inc. систем S-FIL наноимпринтлитографии серии IMPRIO

Параметры	Модель	Imprio 250+	Imprio-HVM
Разрешение наноштампа*, нм		45/32/22	32/22/16
Точность воспроизведения минимального размера, нм, $3\sigma$		5	5
Точность совмещения слоев на пластине, нм		20	7
Производительность при обработке 300-мм пластин, пластин/ч		1 для $d \geq 200$	0,03 для $d \geq 20$
Совместимость с процессами фотолитографии		Совместима	Совместима

\* лимитируется разрешением электронно-лучевой литографии

Относительно низкая стоимость системы S-FIL наноимпринтлитографии (S-FIL НИЛ) по сравнению с другими литографическими системами, а также оценочная стоимость комплекта наноштампов (НШ) в 1 миллион долларов для УТ 45 нм по сравнению с оценочной стоимостью комплекта фотошаблонов (ФШ) в 1,4 миллиона доллара для этого уровня технологии позволяет прогнозировать экономическую эффективность внедрения S-FIL НИЛ в минифабричное производство ИМС, начиная с УТ 45 нм [3].

Проведенные НИИСИ РАН совместно с фирмой Molecular Imprints Inc. работы в области наноимпринтлитографии позволили:

1. Изготовить кварцевый наноштамп (рис. 3) для системы наноимпринтлитографии с тестовой нанотопологией и площадью штамповки 15x15 мм.

2. Сформировать на кремниевых и кварцевых пластинах диаметром 100-200 мм с нанесенными функциональными слоями окиси меди ( $\text{CuO}$ ) толщиной 80 нм и окиси вольфрама ( $\text{WO}_3$ ) толщиной 55 нм с помощью S-FIL НИЛ системы IMPRIO 100 и изготовленного наноштампа в резистивной маске толщиной 100-250 нм тестовые структуры с размерами элементов 50-250 нм и неравномерностью минимального размера по поверхности пластины и от пластины к пластины не более  $\pm 6\%$  (рис. 4).

3. Получить через сформированную маску методом протонного восстановления окислов [12] наноструктуры из меди и вольфрама толщиной 25 нм, шириной от 40 до 250 нм и длиной от 100 до 2400 мкм с удельными сопротивлениями в 2-10 раз большими, чем справочные значения для объемных металлов, и неравномерностью поверхностного сопротивления по площади штамповки не более 25% (рис. 5).

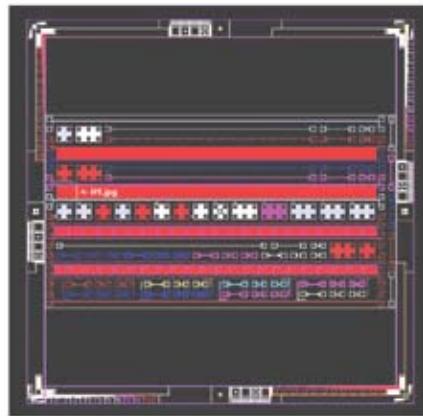


Рис.3. Тестовая топология, сформированная на кварцевом наноштампе, для S-FIL наноимпринтлитографии

4. Обнаружить на полученных с помощью электронного микроскопа с предельным увеличением 40000X фотографиях поперечных сечений тестовых структур уменьшение объема для восстановленных пленок и расширение области восстановления под маску, которое для меди больше, чем для вольфрама, что, может быть, связано с большей толщиной исходного окисла меди (рис. 6).

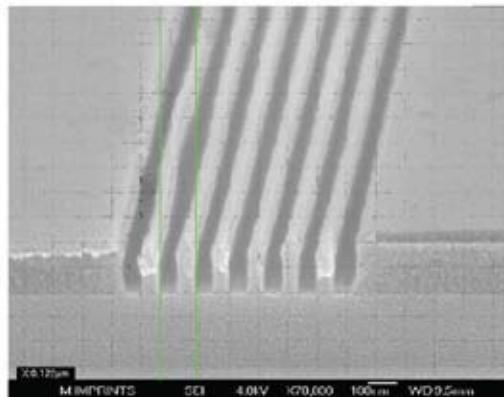


Рис.4. Периодическая структура, сформированная на пластине в маске с толщиной 200 нм с помощью наноштампа (S-FIL процесса), с периодом 100 нм (ширина выступов и канавок – 50 нм)

Использование экзотического метода протонного восстановления окислов через сформированную маску для получения нанотопологии в функциональных слоях вместо традиционных методов "взрывной" (lift-off) литографии и реактивного ионного травления (RIE) вызвано двумя факторами:

- недостаточным разрешением установленного на производственной линейке НИИСИ РАН электронного микроскопа для определения проявления маски на структурах с размерами менее 70 нм;
- отсутствием в России аттестованного оборудования для реактивного ионного травления структур с размерами элементов менее 100 нм. (Для метода протонного восстановления неполное

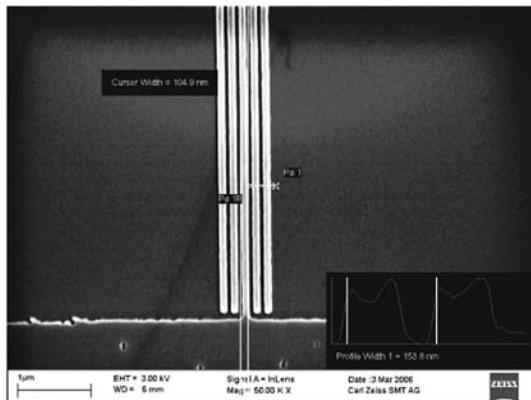


Рис.5. Наноструктуры из восстановленного вольфрама шириной 100 нм и длиной 2400 мкм

проявление органической резистивной маски не является критическим, так как используемые пучки ионов водорода с энергией до 1,2 КэВ [12] могут удалять недопроявленный слой маски перед восстановлением окисла).

#### Выводы

1. С помощью специалистов фирмы Molecular Imprints Inc. изготовлен кварцевый наноштамп с площадью штамповки 15x15 мм и с элементами топологии до 50 нм.

2. Показана возможность получения с помощью этого наноштампа в процессах наноимпринтографии (S-FIL НИЛ) (S-FIL и S-FIL/R процессы) элементов с размерами до 50 нм как в резистивной маске толщиной 150-250 нм, так и в функциональных слоях на кремниевых пластинах.

3. В связи с замедлением темпа развития и быстрым удорожанием систем фотолитографии и комплектов фотомасок для уровней технологии менее 50 нм в условиях мини-фабрик экономически эффективными становятся системы наноимпринтографии.

4. Все преимущества S-FIL НИЛ проявляются при изготовлении приборов на базе регулярных структур, в которых основные характеристики повышаются с уменьшением размеров.

В ближайшие 2-3 года следует ожидать создания мини-фабрик на базе систем наноимпринтографии НИЛ для

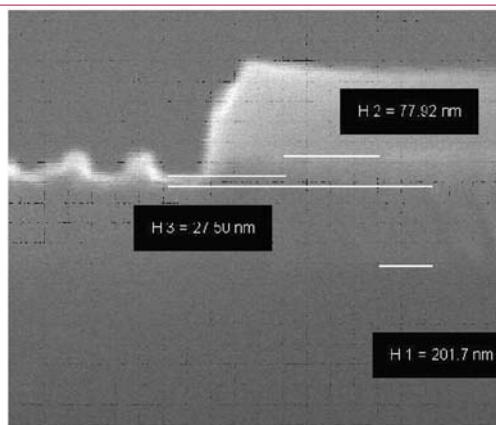


Рис.6. Восстановленный протонным облучением слой меди толщиной 27,5 нм из исходной пленки оксида меди толщиной 77,92 нм

изготовления указанных приборов с минимальными размерами в диапазоне 45-22 нм, а уже потом внедрение S-FIL НИЛ в производство ИМС с уровнями топологии 45, 32 и 22 нм. Такой подход к коммерциализации S-FIL НИЛ разрабатывают ведущие производители промышленных систем наноимпринтографии фирмы Molecular Imprints Inc. (США) и EV Group (Австрия) [13,14].

Авторы выражают благодарность сотрудникам РНЦ "Курчатовский институт" Гуровичу Б.А., Долгому Д.И., Домантовскому А.Г., Кулешовой Е.А., Маслакову К.И., Мисько В.Н., Ольшанскому Е.Д., Приходько К.Е. и Столярову В.Л. за помощь в проведении процессов протонного восстановления оксидов меди и вольфрама.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Киреев В. Технология и оборудование для производства интегральных микросхем. Состояние и тенденции развития. – ЭЛЕКТРОНИКА. Наука. Технология. Бизнес, 2004, № 7, с. 72-77.
- The International Technology Roadmap for Semiconductors, 2005 ed., Semiconductor Industry Association, San Jose, CA.
- Бобков С.Г., Киреев В.Ю. Проблемы перехода микроэлектроники в субстананометровую область. Общие положения и литография. – Нано- и микросистемная техника, 2007, №5-6.
- Silverman P.J. The Intel lithography roadmap. – Intel Technology Journal, 2002, v. 6, No 2, pp. 55-61.
- Resnick D.J., Sreenivasan S.V., Willson C.G. Step and flash imprint lithography. – Materials Today, February 2005, pp. 34-42.
- Mancini D.P., Resnick D.J., Sreenivasan S.V. et al. S-FIL for sub-80 nm contact hole patterning. – Solid State Technology, February 2004, pp. 55 - 58.
- Resnick D.J., Schmid G., Miller M. Et al. High-volume full-wafer step-and-flash imprint lithography. – Solid State Technology, February 2007, pp. 39 - 43.
- Wang D., Rafferty T., Schumaker P. et al. Advanced prototyping using step and flash imprint. – Solid State Technology, December 2005, pp. 60-62.
- Product catalog. 2005. Molecular Imprints, Inc. – [www.molecularimprints.com](http://www.molecularimprints.com).
- Sreenivasan S.V., McMackin I., Xu F. et al. Using reverse-tone bi-layer etch in UV nanoimprint lithography. – Micro Magazine, January/February 2005, pp. 37-45.
- Smith B.J., Stacey N.A., Donnelly J.P. et al. Employing step and flash imprint lithography for gate level patterning of a MOSFET device. – Proc. SPIE, 2003, v. 5037.
- Гурович Б.А., Долгий Д.И., Кулешова Е.А. и др. Управляемая трансформация электрических, магнитных и оптических свойств материалов ионными пучками. – Успехи физических наук, 2001, т. 171, № 1, с. 105-117.
- Nanoimprint litho going global. – Microlithography World, February 2005, v. 14, № 1, p. 16.
- Hand A. Nanoimprint lithography and its predicted liftoff - Semiconductor International, December 2005.