На основании представленных на рис. 2 калориметрических измерений мелкокристаллического порошка сульфата натрия можно сделать заключение о существовании фазового перехода при температуре 519 К. Согласно обозначениям [5] это является переходом из (III) в (I). Можно вычислить удельную энтальпию данного фазового превращения:  $\Delta H_{[509,5; 565]}$ =76,2 Дж/г. На калориметрической кривой C=C(T) отсутствуют пики, соответствующие иным переходам. По-видимому, это объясняется малостью энтальпий соответствующих процессов.

Таким образом, согласно нашим исследованиям (спектроскопия и калориметрия), существует следующая схема переходов в Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:

 $\xrightarrow{440\,\text{K}} \text{Na}_2\text{SO}_4 (\text{IV}) \xrightarrow{400\,\text{K}} \text{Na}_2\text{SO}_4 (\text{III}) \xrightarrow{319\,\text{K}} \text{Na}_2\text{SO}_4 (\text{I}).$ Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(V) -

Следует заметить, что спектральные исследования кристалла Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> при различных температурах более чувствительны к микроструктурным изменениям и позволяют изучать фазовые превращения in-situ.

Naruse H., Tanaka K., Morikawa H. et al. // Acta Cryst. 1987. Vol. B43. P. 143.
Mehrotra B.N. // Z. Kristallographie. 1981. Bd. 155. S. 159.
Nord A.G. // Acta Chem. Scandinavica. 1973. Vol. 27. P. 814
Kabo A.G., Diky V.V. // Termochimica Acta. 2000. Vol. 347. P. 79.
Bin Xu // In-situ Raman Spectroscopic Study of Phases and its Transitions on Single levitated Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Microparticle. Bochum, 1999.
Choi B.K., Lockwood D.J. // Solid State Communications. 1989. Vol. 72. № 1. P. 133.
Choi B.K., Labbe H.J., Lockwood D.J. // Solid State Communications. 1989. Vol. 72. № 1. P. 133.

Vol. 74. № 2. P. 109. 8. Choi B.K., Lockwood D.J. // Solid State Communications. 1990. Vol. 76. № 6. P. 863.

9. Пуле А., Матье Ж.-П. Колебательные спектры и симметрия кристаллов. М., 1973.

Поступила в редакцию 07.10.2000

Барашков Михаил Валерьевич – аспирант. Научный руководитель А.И. Комяк. Комяк Анатолий Иванович – доктор физико-математических наук. Шашков Сергей Николаевич – кандидат физико-математических наук.

УДК 537.311

А.Н. ДЕРКАЧ, С.В. ГРАНЬКО, Ф.Ф. КОМАРОВ, А.В. ЛЕОНТЬЕВ, Т.Е. СУГАКОВА

## ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТИВНЫХ МАСОК В ТЕХНОЛОГИИ КМОП-ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

The problem questions of the ion beam masking in microelectronics are considered. It shown, that the decision of the put task consists of two parts: a choice of optimum thickness of a protective mask and control of the technological defect.

В последнее время развитие микроэлектроники определялось прогрессом в конструировании и развитием физических основ функционирования приборов. В настоящее время, когда основные принципы создания микроэлектронных приборов достаточно известны, массовое производство схем с большой плотностью элементов предъявляет высокие требования к технологическим процессам формирования элементной базы, в частности, возрастает роль ионной имплантации. Повышение степени интеграции предъявляет высокие требования к блоку операций, обеспечивающих маскирование ионного пучка. Учитывая, что одним из основных материалов маскирующего покрытия являются фоторезисты (ф/р), то их влияние на образование технологических дефектов имеет чрезвычайно важное значение. Так, если при формировании элементной базы по *п*-МОП-технологии применяется до 10 операций фотолитографии, из которых маскирование ионного легирования обеспечивают три (изделие К565РУ11), то при формировании элементной базы по БИКМОП-технологии применяется до 22 операций фотолитографии, из которых маскирование обеспечивают около 12 (изделие ILA8362A).



This document has been edited with Infix PDF Editor free for non-commercial use Применение ф/р в качестве маскирующих покрытий при переходе к субмикронным размерам элементов требует решения ряда физических и технологических задач. К первому типу проблем относится оптимизация толщины защитного слоя. Основная проблема здесь состоит как в отсутствии надежных экспериментальных и расчетных данных по пробегам ускоренных ионов в позитивных ф/р, так и с недостаточной определенностью степени их усадки в зависимости от условий облучения. Одной из важнейших технологических задач является контроль степени дефектности полупроводниковых пластин (п/п) после плазмохимического удаления защитной пленки. Процесс травления носит взрывной характер, приводящий к возникновению ряда технологических дефектов: трещин, кружевных сеток, звездообразных растравов. Данные явления носят случайный характер и способствуют возникновению неравномерностей на поверхности пластины.

Применение спектральных методов диагностики плазмохимического травления не позволяет с достаточной точностью оценить степень снятия ф/р с поверхности пластины, так как требования технологической дефектности чрезвычайно высоки, а размеры дефектов для данных методов малы, но «болезненны» для формируемых на следующих этапах структур. Тенденция увеличения диаметра подложек требует высокой воспроизводимости процессов по всей площади обрабатываемой поверхности, поэтому исследования распределения дефектов по поверхности пластины представляются особо важными для оптимизации процесса.

Исходя из сказанного, целью настоящей работы являлась разработка физико-технологических аспектов оптимизации процесса маскирования ионного пучка в технологии микроэлектроники.

# Материал и методика

Для исследования использовались пластины КДБ-12 диаметром 150 мм, которые являются основой для производства современных интегральных схем (ИС) высокой степени интеграции. Для обеспечения достаточной степени чистоты поверхности была проведена специальная химическая обработка и измерена начальная технологическая дефектность. Ее замер производился на установке «Surfscan 4500». Данный метод заключается в сканировании поверхности пластины пучком излучения гелий-неонового лазера ( $\lambda$ =632,8 нм) и анализе распределения интенсивности отраженного, рассеянного на дефектах и пропущенного излучения. Для дальнейшей работы были выбраны пластины с технологической дефектностью, характеризующейся числом частиц не более 300, площадью свыше 0,24 мкм<sup>2</sup>. Для исследования геометрической конфигурации фоторезистивных пленок на рельефе на нескольких пластинах был получен ступенчатый рельеф глубиной около 0,5 мкм (наибольшая глубина рельефа в технологии производства ИМС) селективным плазмохимическим травлением кремния.

Исследования проводили на позитивном ф/р S1813 SP15 фирмы Shipley (США), состоящем из фенолформальдегидной смолы ( $\approx$ 28 %) и 2-метокси-1-метилэтил ацетата в качестве растворителя ( $\approx$ 72 %). На отобранные пластины пленки фоторезиста наносились на установке «Лада-150А». Толщины пленок (*d*) были выбраны: *d*<sub>1</sub>=1,1 мкм (минимальная толщина пленки используемого ф/р, наносимой на данном оборудовании) и *d*<sub>2</sub>=1,4 мкм (данное значение используется почти на всех операциях фотолитографии). Предварительная обработка поверхности проводилась в ГМДС (*t*=60 с) при холодной плите. Формирующая скорость *V*<sub>2</sub> =4000 об/мин. Сушку осуществляли в следующих режимах: *t*=114±3 °C, 85 с. Задубливание ф/р проводили в две стадии: *t*<sub>1</sub>=85±3 °C, 80 с; *t*<sub>2</sub>=95±3 °C, 85с. Внедрение больших доз ионов проводили на установке «Везувий-5». Ионы В<sup>+</sup> имплантировались с энергией *E*=30 кэВ (режимы формирования слоя «Р+ стоки» КМОП-технологии), а ионы Р<sup>+</sup> и As<sup>+</sup>, Sb<sup>+</sup> – с энергией *E*=60 кэВ («N+ стоки» КМОП-технологии и

27



This document has been edited with **Infix PDF Editor** - free for non-commercial use «N+ скрытые слои» БИКМОП-технологии). Плотность тока, создаваемого ионным источником J=(4-18) мА/см<sup>2</sup>, вертикальное сканирование пучка обеспечивалось электростатически с частотой 200 Гц, горизонтальное – механически, вращением карусели со скоростью 0,33 об/с. Учитывая конфигурацию пучка, характер облучения можно принять за импульсный с продолжительностью импульса 0,05 с и промежутком 2,95 с. По энергетическому воздействию с учетом сканирования плотность тока составила около 0,2 мкА/см<sup>2</sup>. Дозы для исследования были выбраны от 250 до 1000 мкКл/см<sup>2</sup>. Легирование малыми и средними дозами ионов B<sup>+</sup> (до  $2 \times 10^{15}$  см<sup>-2</sup>) проводилось на установке «Днепр-М» энергиями от 20 до 100 кэВ. На данном оборудовании выполняется поштучная обработка пластин вертикальным и горизонтальным электромагнитным сканированием ионного луча с плотностью тока до 20 мкА/см<sup>2</sup>. По энергетическому воздействию с учетом сканирования лотность ока составила обработка пластин вертикальным и горизонтальным электромагнитным сканированием ионного луча с плотностью тока до 20 мкА/см<sup>2</sup>. По энергетическому воздействию с учетом сканирования плотность около 0,1 мкА/см<sup>2</sup>.

Исследование усадки ф/р проводили механическим способом на профилометре «Dectak» в качестве основного и методами эллипсометрии и растровой электронной микроскопии в качестве вспомогательных. Плазмохимическое травление выполняли на установке «Matrix-108», оснащенной генератором радиального типа, мощностью 800 Вт. Процесс происходит в разряде частотой 2,45 ГГц. Состав среды: 73,7 % кислорода, 25,2 – азота, 1.1 % хладона-14. Регистрация окончания процесса травления осуществлялась по увеличению интенсивности излучения отдельных линий спектра атома углерода. В качестве момента окончания травления принято считать увеличение интенсивности излучения на 6 %.

#### Результаты и их обсуждение

Как уже отмечалось, проблему, связанную с оптимизацией процесса маскирования фоторезистами, можно рассматривать как состоящую из двух основных частей. Первая – оптимизация толщины защитной маски с учетом как траекторных параметров внедряемых ионов, так и усадки ф/р при облучении. Второй аспект связан с возникающей после удаления ф/р технологической дефектностью. Обсуждение обеих составляющих частей проблемы проведем на примере маскирования ионов бора. Маскирование фоторезистами при селективном легировании ионами бора – процесс в достаточной степени отработанный, но в случае перехода к субмикронным размерам при оптимизации толщины защитной маски необходима привязка к надежным экспериментальным данным по пробегам ионов В<sup>+</sup>. Большое количество надежных значений величин R<sub>p</sub> ионов В<sup>+</sup> приведено в [1, 2]. Однако в [2], как и в большинстве других работ по пробегам ионов бора в фоторезистах, недостаточное внимание уделялось их усадке при облучении. В таблице приведены результаты эллипсометрических измерений толщины пленок ПММА (позитивный электронорезист) после ионного облучения. Как видно, величина усадки защитной маски может достигать 60 % при дозах облучения  $D=1\times10^{15}$  см<sup>-2</sup>, что необходимо учитывать при выборе оптимальной толщины. Естественно, что усадка ф/р дает увеличение его плотности, что в принципе может частично компенсировать уменьшение толщины. Количественные оценки увеличения плотности ф/р после имплантации выполнить достаточно сложно, поэтому мы определяли коэффициент преломления (n) пленок ПММА, подвергнутых ионному облучению. Результаты таких исследований показывают [3]. что увеличение n в рассмотренных условиях облучения может достигать 20 %. Следовательно, уплотнение ф/р в случае имплантации легких ионов не сможет компенсировать их усадку и должно учитываться на стадии разработки техпроцесса.

На рис. 1 приведена зависимость толщины пленки фоторезиста SP1813 от энергии внедряемых ионов бора. Исходная толщина составляла 1,4 мкм, что соответствует стандартным условиям проведения процесса маскирова-



This document has been edited with **Infix PDF Editor** - free for non-commercial use ния. Видно, что величина усадки значительно меньше, чем для модельного материала (ПММА) и достигает примерно 20 %.



Исходя из изложенного, толщина защитной пленки для маскирования ионов бора (d<sub>M</sub>) при использовании позитивных ф/р (их основа одна и та же) может быть оценена по формуле:

#### $d_{\rm M} = (R_{\rho} + 2\Delta R_{\rho}) (1 + \Delta) + h_{\rho},$

где  $R_{\rho}, \Delta R_{\rho}$  – проецированный пробег и страгглинг внедряемых ионов,  $h_{\rho}$  – высота ступенчатого рельефа (если он имеется),  $\Delta$  – величина усадки фоторезиста при облучении, являющаяся функцией энергии и дозы облучения.

Первые два из перечисленных параметров могут быть рассчитаны теоретически, например, методом Монте-Карло [4]. Величина Δ может быть определена только экспериментальным путем. Результаты проведенных нами экспериментов по анализу усадки широкого круга отечественных (ФП-383, ФП-404 и др.), а также импортных ф/р позволили сделать приемлемые оценки величины  $\Delta$  для наиболее практически важных случаев. При *E*<50 кэВ и *D*<1×10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup> величина  $\Delta$ =0,1. Если *D*>1×10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>, то  $\Delta$ =0,2. В диапазоне энергий 50 кэВ<*E*<100 кэВ для доз *D*>5×10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>  $\Delta$ =0,2. При меньших дозах ∆=0,1. Оценим, исходя из предложенного подхода, толщину маски, необходимой для маскирования ионов  $B^+(100 \text{ кэB}, D = 1 \times 10^{15} \text{ см}^{-2})$ . В этом случае имеем:  $R_o=0.45$  мк,  $\Delta R_o=0.07$  мк и  $d_M=0.71$  мк. Это в два раза меньше, чем закладывается в стандартный технологический процесс.

Спектральные методы контроля процесса плазмохимического удаления травления фоторезистивных пленок, подвергнутых ионному облучению, оказались неэффективными. Так, на образцах, облученных ионами В<sup>+</sup> и Р<sup>+</sup> травление прекращалось в момент увеличения интенсивности излучения на 6 %. При этом на них фиксировались остатки фоторезиста. Описанные факты объясняются неоднородностью характера взаимодействия кислородной плазмы со слоями фоторезиста с разной степенью изменения структуры. Контактный нагрев пластины до 250 °С перед включением разряда в реакторе установки ПХУФ приводит к короблению и растрескиванию пленки. Не подвергнутые структурному разрушению нижние слои менее термически устойчивы, и их температура выше, так как нагрев происходит со стороны подложки. Поэтому они будут интенсивней испаряться, ломать устойчивые имплантированные слои, образуя трещины глубиной до подложки, которые обеспечивают контакт частиц плазмы с нижними слоями. (Локальная скорость травления последних выше.) Дальнейшее удаление фоторезиста идет именно по трещинам, которые затем увеличиваются как по ширине, так и по длине, формируя кружевные сетки, которые в свою очередь распространяются по поверхности и превращают остатки фоторезиста в ост-

100 E. K3B



This document has been edited with Infix PDF Editor free for non-commercial use ровки, уменьшающиеся со временем в размерах. Представленная схема удаления фоторезиста подтверждается результатами анализа поверхности подложек методом электронной микроскопии при разных временах травления и детально будет рассмотрена отдельно.

Поскольку пробеги ионов В<sup>+</sup> и Р<sup>+</sup> в рассматриваемом диапазоне энергий в ф/р составляют по данным ВИМС-анализа 0,2–0,5 мкм, то при травлении насыщают углеродом плазму именно необлученные слои. Вклад в концентрацию углерода в плазме от слоев, подвергнутых облучению, незначителен. Поэтому время снятия ф/р, определенное спектральными методами, слабо зависит от дозы облучения.

На рис. 2 представлена зависимость количества инородных частиц (N) на поверхности пластин от времени удаления  $\phi$ /р пленок толщиной 1,1 и 1,4 мкм, облученных ионами Р<sup>+</sup> (E=60 кэВ, D=1000 мкКл/см<sup>2</sup>). Видно, что величина N существенно меньше для более тонких пленок в случае, когда время травления ( $\tau$ ) составляет до 80 с. При стандартных значениях  $\tau$ =60 с отношение N (d=1,4 мкм)/ N (d=1,1 мкм)≈10, что свидетельствует в пользу применения более тонких слоев маскирующей пленки. Результаты исследований показывают, что общая площадь загрязнений тоже уменьшается.

На рис. 3 приведено распределение количества инородных частиц по значениям их площадей, которое можно объяснить следующим образом. Предположим, что в конкретный момент времени скорость уменьшения площади конкретной частицы пропорциональна этой площади dS/dt = -kS.

### или

30

# $S=S_0e^{-\alpha}$

где *k* зависит от состояния образцов и режимов травления. Распределение количества частиц по их площадям можно объяснить, применив классическую эргодическую гипотезу, а динамику изменения количества этих частиц тем, что в данном режиме работы измерительного оборудования частицы площадью меньше 28 мкм<sup>2</sup> не регистрируются.

N





Рис. 2. Зависимость числа (*N*) инородных частиц от времени травления (т) на поверхности п/п пластины: 1-d=1.4 мкм: 2-d=1.1 мкм

Рис. 3. Распределение количества инородных микрочастиц на поверхности п/п пластины по площадям:

Таким образом, показано, что проблема маскирования ионного пучка фоторезистивными пленками состоит из двух органически сочетаемых аспектов: контроль усадки фоторезиста и контроль технологической дефектности. Решение этих двух проблем должно проводиться одновременно и быть привязано к другим факторам производственного, технологического и экономического характера. Из всего сказанного можно сделать вывод, что наиболее оптимальной по сравнению с используемой в технологическом цикле является толщина маскирующей пленки, равная 1,1 мкм, которая будет опробована на одной из партий освоенных изделий.



This document has been edited with **Infix PDF Editor** - free for non-commercial use 1. Wilson R.G. // J. Appl. Phys. 1993. Vol. 73(5). P. 2215.

2. Комаров Ф.Ф., Леонтьев А.В., Григорьев В.В., Гранько С.В.// Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2000. № 1. С. 75.

З. Комаров Ф.Ф., Леонтьев А.В., Гранько С.В.идр. // Вестн. Белорус. ун-та. 1999. № 3. С. 16.

4. Ziegler J.P., Biersack J.P., Littmark U. Stopping and Ranges of lons in Solids. New York, 1985.

Поступила в редакцию 17.11.2000.

Деркач Александр Николаевич – инженер-технолог НПО «Интеграл». Гранько Сергей Владимирович – инженер-технолог НПО «Интеграл». Комаров Фадей Фадеевич – член-корреспондент НАН Беларуси. Леонтьев Александр Викторович – кандидат физико-математических наук. Сугакова Татьяна Евгеньевна – инженер-технолог НПО «Интеграл».

УДК 538.97.405

#### ЧЕСЛАВ КАРВАТ (ПОЛЬША)

## УСТАНОВКА ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ СЛОЕВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО ИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

A novel type of the apparatus for disposition of layers by the dynamic ion-beam mixing and ionbeam assistence is treated. The main functional factures of this system are discussed.

Процесс ионной имплантации, обеспечивающий получение слоев с заданными свойствами, предъявляет к параметрам ионного пучка ряд требований. Наиболее существенными из них являются энергия ионов, плотность ионного тока и ее равномерность по облучаемой поверхности. Плотность ионного тока определяет как время, необходимое для набора заданной дозы имплантации, так и мощность, выделяемую на имплантированной поверхности. В случае больших плотностей тока мощность, выделяемая на единицу поверхности, достигает нескольких Вт.см<sup>-2</sup>, что может привести к значительному росту температуры имплантированного материала и неконтролируемым изменениям его физических свойств.

Допустимая неоднородность плотности ионного тока на имплантируемой поверхности обусловлена принятой технологией проведения исследований и в случае ионного перемешивания не должна превышать 10 % [1]. В промышленных установках для достижения такой неоднородности необходимо применять механическое сканирование облучаемой поверхности или электростатическую развертку пучка ионов. На представленной далее исследовательской установке при обработке поверхности диаметром до 50 мм была предпринята попытка получения однородного пучка без его развертки. Для достижения этой цели сделаны изменения конструкции ионного источника, а также проведена оптимализация распределения потенциалов на элементах ионно-оптической системы.

#### Тестирование параметров работы установки

Установка ионного перемешивания (рис. 1) состоит из следующих основных узлов: ионно-оптического, служащего для создания и формирования ионного пучка [2, 3]; держателя образцов с регулируемой температурой (80÷600 K); прецизионного источника атомов, осаждаемых на обрабатываемой поверхности; системы электропитания установки; вакуумной системы; системы контроля электрических свойств обрабатываемой поверхности [4].

В установке с целью повышения безопасности обслуживания и обеспечения контроля электрических параметров наносимых слоев камера с образцами находится под потенциалом земли. В связи с этим элементы питания ионного источника и ускорительной системы находятся под высоким потенциалом. В установке применено питание из сети, а для ее изоляции от





This document has been edited with **Infix PDF Editor** - free for non-commercial use.

To remove this notice, visit: www.iceni.com/unlock.htm