

К. т. н. С. П. НОВОСЯДЛЫЙ

Украина, г. Ивано-Франковск, Прикарпатский университет им. В. Стефаника
E-mail: nsp@pu.if.ua

Дата поступления в редакцию
01.11 2001 г.—27.09 2002 г.

Оппонент к. ф.-м. н. В. И. ФАРЕНИК
(НФТЦ ХНУ им. В. Н. Каразина, г. Харьков)

ПЛАЗМЕННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СУБМИКРОННЫХ СТРУКТУР БИС

Приведены результаты исследований высокочастотных плазменных процессов осаждения и травления функциональных слоев при формировании субмикронных структур БИС.

Субмикронная технология БИС с топологическими нормами 0,25—0,8 мкм предъявляет новые требования к плазмохимическим процессам осаждения и травления.

В настоящей статье исследуются плазмохимические процессы, которые не приводят к радиационным повреждениям и увеличению дефектности (“no-radiation-damage”) при осаждении функциональных слоев, а также увеличивают, в сравнении с другими методами [1, 2], селективность и анизотропность травления, повышая при этом скорость осаждения и травления функциональных слоев с использованием явления электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) [3, 4].

Высокочастотное ионно-плазменное осаждение геттерных оксинитридных пленок $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$

Для уменьшения генерационно-рекомбинационных процессов на межфазной границе раздела Si—SiO₂ разработан процесс высокочастотного магнетронного распыления кремниевой мишени КДБ-80 в плазме азота. Это позволяет сформировать низкотемпературный оксинитридный геттер без водородных соединений Si—H, эффективно геттерирующий зарядовые состояния и заряды как с межфазной границы, так и с оксида, и тем самым обеспечивает и высокую термополевую стабильность электрических параметров интегральных схем, и снижение дефектности их функциональных слоев.

Экспериментальные исследования проводились с использованием высокочастотного магнетрона установки “Оратория 5” и генератора ВЧГ-2,5-13,5. В качестве кремниевой мишени использовались пластины КДБ-80 (111) монокремния Чохральского (Ч) с содержанием изоконцентрационной примеси кислорода $N_{\text{O}_2} \geq 1,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Определяющим параметром, по которому оценивалась эффективность сформированного оксинитридного геттера, служил показатель преломления в пределах $n=1,78—2,05$, который задавался величиной ионного тока азотной плазмы и содержанием изоконцентрационной примеси кислорода в кремниевых пластинах Чохральского. Скорость осаждения пленки $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$ обеспечивалась мощностью

высокочастотного генератора (13,56 МГц) и составляла $\geq 50 \text{ Å/мин}$. Высокая равномерность нанесения пленки ($\pm 3\%$) обеспечивалась планетарной системой установки “Оратория-5”.

Оксинитридный геттер формировался медленным охлаждением от температуры 950°C до комнатной на протяжении 3,5—4 часов. Эффективность действия геттера оценивалась по тестовым структурам в виде диода и биполярного транзистора с оценкой m -фактора генерационно-рекомбинационных процессов, коэффициента усиления супер- β -транзистора, величины и термополевой стабильности порогового напряжения ΔU_T , напряжения плоских зон ΔU_{FB} .

Проведенными исследованиями установлены закономерности формирования высокочастотного плазменного оксинитридного геттера от содержания изоконцентрационной примеси кислорода в монокремнии (Ч) КДБ-80 $N_{\text{O}_2} = 1,7 \cdot 10^{16}—1,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, которые представлены в виде зависимости коэффициента преломления пленки на рис. 1 (мощность азотной плазмы 0,5—1,2 кВт, температура осаждения 50—250°C). Высокая конформность пленки ($\geq 0,95$) определялась потенциалом смещения на кремниевой пластине $-25 \dots -110 \text{ В}$.

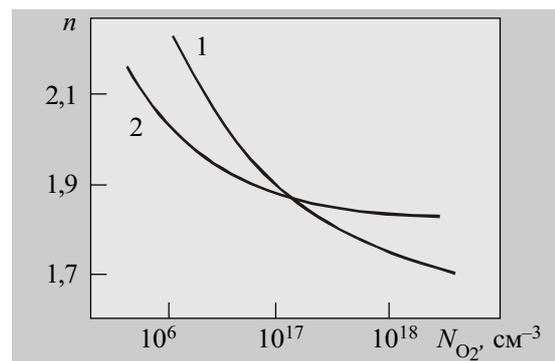


Рис. 1. Зависимость коэффициента преломления оксинитридной пленки от содержания изоконцентрационной примеси кислорода в мишени монокремния Чохральского:

1 — КДБ80-(100); 2 — КЕФ4,5-(100)

Установлено, что оксинитридный геттер, сформированный ионно-плазменным магнетронным распылением в азотной плазме кремниевой мишени, позволяет уменьшить m -фактор с 1,25—1,28 до 1,02—1,05, повысить коэффициент усиления супер- β -транзистора до 35—80 тыс. и обеспечить стабильность ΔU_T , ΔU_{FB} в пределах 0,05—0,1 В для температуры +150°C.

Формирование текстурированного геттера плазмохимическим травлением обратной стороны кремниевых пластин

Для снижения дефектности функциональных слоев БИС, которые определяют выход годных структур, разработана технология формирования текстурированного геттера на тыльной стороне Si-пластин, сформированного высокочастотным плазмохимическим травлением в плазме CF_4+O_2 изменением мощности плазмы, которая определяет текстуру поверхности кремния. Экспериментальными исследованиями установлено, что степень текстурирования поверхности кремния чувствительна к определенному типу плазмы и к величине изоконцентрационной примеси кислорода в Si-пластинах (Ч).

Эффективность такого текстурированного геттера оценивалась по термополевоому дрейфу порогового напряжения МОП-транзисторов, сформированных в виде тестовых структур, и оценкой времени жизни неосновных носителей заряда. Увеличение содержания O_2 в плазме CF_4+O_2 от 8 до 19% увеличивает текстурированность поверхности в 1,5—5 раз в зависимости от концентрации кислорода в Si-пластинах (Ч) соответственно от $1,7 \cdot 10^{16}$ до $1,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Термополевоый дрейф порогового напряжения и напряжения плоских зон $\Delta U_T, \Delta U_{FB}$ составлял $\leq 0,15$ и $0,08 \text{ В}$ для температуры 150°C , соответственно, в сравнении с текстурированными геттерами, сформированными на таких же Si-пластинах травлением в кислотном селективном травителе на основе надуксусной кислоты $HF:HNO_3:CH_3COOH=1:3:9$ и в щелочном травителе $KOH:H_2O=1:2$. Дрейф для последних составлял соответственно $\Delta U_T \leq 0,3 \text{ В}$, $\Delta U_{FB} \leq 0,15 \text{ В}$ и $\Delta U_T \leq 3,5 \text{ В}$, $\Delta U_{FB} \leq 1,8 \text{ В}$ (рис. 2, где C/C_0 — отношение емкости к емкости плоских зон структуры Si—SiO₂).

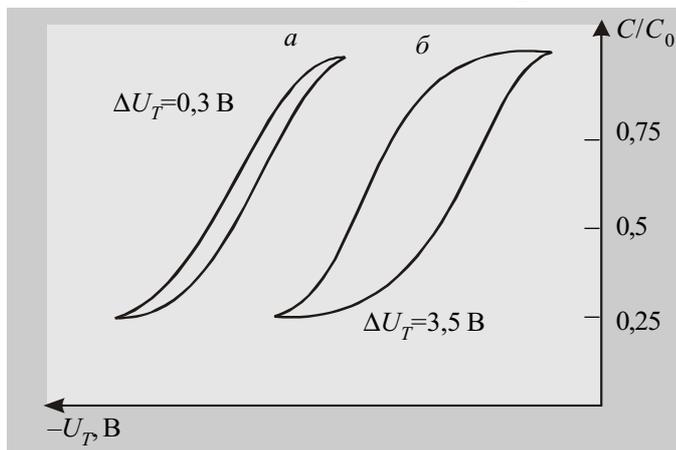


Рис. 2. Дрейф порогового напряжения на кремниевых пластинах Чохральского КЕФ4,5-(111):

a – травитель на основе надуксусной кислоты; *б* – щелочной травитель

Следует отметить, что такой текстурированный геттер увеличивает, как минимум, на порядок время жизни неосновных носителей заряда, а щелочное текстурирование поверхности отличается очень большой термополевооой нестабильностью порогового напряжения ΔU_T и напряжения плоских зон ΔU_{FB} . Это один из высокотехнологичных внешних геттеров, который можно повторно наносить во время формирования структур БИС.

Плазмохимические процессы осаждения и травления в зоне послесвечения объемных реакторов электронно-циклотронного резонанса

Сущность процессов обработки вне зоны плазмы реактора состоит в том, что рабочий газ, который подается в зону плазмы, разлагается в ней на химически активные частицы (заряженные — ионы и незаряженные — радикалы), которые благодаря диффузии и направленному газовому потоку достигают Si-пластин вне зоны плазмы (в зоне послесвечения) и вступают в химическую реакцию на ее поверхности с образованием летучих компонентов. Радикалы и заряженные частицы, которые попадают на обрабатываемую поверхность Si-пластин, имеют достаточную энергию для осаждения слоя или травления его, но уже недостаточную для внесения радиационных повреждений и дефектности структур БИС. Кроме того, можно устанавливать сетку-электрод под определенным электрическим потенциалом и сепарировать активные частицы на заряженные и незаряженные, а также дополнительно вводить различные реактивные газы в поток, который выходит из плазмы [4].

Химические реакции этих газов с потоком атомов и радикалов активируют новые частицы. Это делает процессы осаждения и травления высокоуправляемыми и высокотехнологичными. Характеристики плазмохимических процессов осаждения и травления на основе ЭЦР-реакторов приведены в табл. 1 и 2.

Для экспериментальных исследований использовались как высокочастотные установки типа 08 ПХО 100Т-005, -006, -007, -008, так и установки с ЭЦР-реакторами типа GIR-820 А, 500 В, которые работают на частотах f_p 13,56 МГц и 2,45 ГГц, а также фторные, кремниевые и хлорные соединения: $CF_4, CHF_3, C_3F_8, SF_6, SiCl_4, SiH_4, Si_2H_6, CHCl_3$.

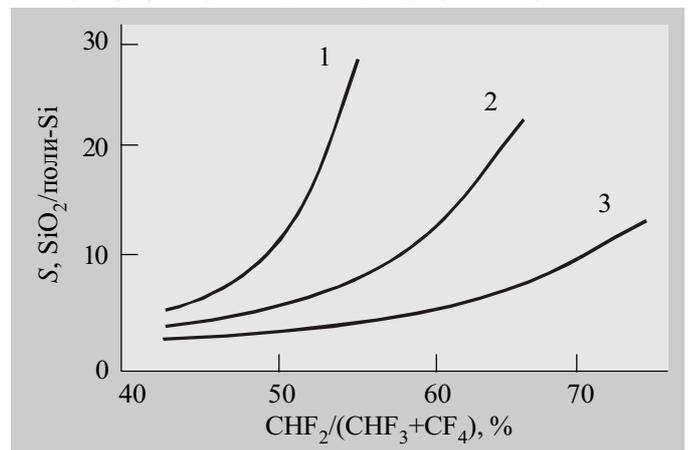


Рис. 3. Зависимость селективности травления пленки оксид/поли-Si от содержания фреона 23 во фреоне 14 для различных значений мощности плазмы:

1 — 500 Вт; 2 — 625 Вт; 3 — 700 Вт

На рис. 3 представлена зависимость селективности плазмохимического травления (*S*) пленки оксид/поли-Si от содержания фреона 23 во фреоне 14 и мощности плазмы установки 08 ПХО-100Т-008.

Осаждение оксинитридной пленки кремния.

Пленки оксинитрида кремния, осажденные в ЭЦР-реакторе при комнатной температуре, имеют свойства на порядок лучше, нежели пленки, осажденные си-

Таблица 1

Плазменное осаждение пленок в СВЧ ЭЦР-реакторах

Пленка	Мощность, Вт	Давление, Па	Температура подложки, °С	Скорость роста, нм/мин	Реагенты	Соотношение расхода газов	Примечание
SiO ₂	300	2,7·10 ⁻²	50	27	O ₂ (в плазму), Si ₂ H ₆ к Si-подложке	—	Замена SiH ₄ на Si ₂ H ₆ увеличивает скорость в 2 раза
	500	10 ⁻² —0,1	150	68	То же	2:1	
	350	1,2·10 ⁻¹	250	75	"	2:1—1:1,5	
Si ₃ N ₄	250	2,7·10 ⁻²	100	23	N ₂ (в плазму), Si ₂ H ₆ к Si-подложке	2:1	
	450	5,3·10 ⁻² —1,6·10 ⁻¹	150	14	N ₂ (в плазму), SiH ₄ к Si-подложке	2:1	
Поли-Si	500	2,7·10 ⁻²	150	26	Ar (в плазму), Si ₂ H ₆ к Si-подложке	2:1	
					Ar (в плазму), HMDS к Si-подложке	2:1	
α-Si	500	6,7·10 ⁻¹ —20	150	68	Ar (в плазму), SiH ₄ к Si-подложке	4:1	
Si _x N _y O _z	350	2,7·10 ⁻²	75	38	N ₂ , O ₂ (в плазму), SiH ₄ к Si-подложке	3:1	

Таблица 2

Плазменное травление в СВЧ ЭЦР-реакторах

Материал	Мощность, Вт	Давление, Па	Реактивный газ	Потенциал смещения, В	Скорость травления, нм/мин	Анизотропность	Селективность	Примечание
Моно-Si, легированный В	700	2,7·10 ⁻² —0,13	Cl ₂ +SF ₆	-75 (13,56 МГц)	200—1200	1—0,75	10—12 (Si/SiO ₂)	
Моно-Si, легированный Р	300	5·10 ⁻² —2·10 ⁻¹	SF ₆ +Ar	-100	60—120	~0,9	~12 (Si/SiO ₂)	
Поли-Si	200	6,5·10 ⁻²	Cl ₂	-20	20—50	0,7—0,9	18 (поли-Si/SiO ₂)	
Поли-Si, легированный	1000	6,5·10 ⁻² —4·10 ⁻¹	Cl ₂	-150	185—320	0,95	75—100 (поли-Si/SiO ₂)	
SiO ₂ (сухой)	60	6,5·10 ⁻²	CF ₄	100	10—30	>0,95	1—4 (Si/SiO ₂)	
SiO ₂ (влажный)	700	2,7·10 ⁻² —1,3·10 ⁻¹	SF ₆ +Cl ₂	-75 (13,56 МГц)	75—150	>0,85	3—9 (Si/SiO ₂)	
Фоторезист	400	5,3·10 ⁻²	O ₂	-250	200—900	—	—	Проходит процесс силилирования
ФН-1			O ₂ +HMDS	-200	400—600	—	—	
Полиимид ПИК	400	5,3·10 ⁻²	O ₂	-300	50—200	—	—	
Si ₃ N ₄ , Si _x O _y N _z	500	2,7·10 ⁻² —1,3·10 ⁻¹	CF ₄ +CHF ₃ CF ₄ +SF ₆	-100	75—150	>0,95	4—12 (Si ₃ N ₄ /Si)	При введении H ₂ скорость травления растет
АК-1 Силициды	700	2,7·10 ⁻² —2·10 ⁻¹	SiCl ₄ +BCl ₃	-150	35—125	>0,85	5—8 (АК-1/SiO ₂)	

лановой технологией в реакторах пониженного давления, т. к. в них имеется минимальное количество водорода. При исследовании пленок $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$ спектральной четкой проявляются пики связи Si—N (волновое число 845 см^{-1}) и Si—O (волновое число 1165 см^{-1}) и полностью отсутствуют пики Si—H (волновое число 2180 см^{-1}), N—H (волновое число 3450 см^{-1}), что обеспечивается их сепарацией. Соотношения Si/O, Si/N определяются как частотой и типом волн СВЧ электромагнитного поля плазмы, так и их мощностью, что увеличивает плотность плазмы на один—два порядка согласно выражению [3]

$$N_x = K \frac{R_x V}{G} p, \quad (1)$$

где R_x , N_x — скорость генерации и концентрация активных частиц плазмы, соответственно;

K — константа определенного реактора;

V — объем плазмы;

G — скорость массопереноса;

p — общее давление в реакторе.

Изменение кислорода в пределах 3,5—18% дает возможность формировать высококачественные геттерные оксинитридные пленки с коэффициентом преломления 1,78—2,1, которые по эффективности действия геттера лучше оксинитридных пленок, осажденных ВЧ магнетронным распылением кремниевой мишени и сформированных многозарядной имплантацией кислорода и азота, поскольку последние требуют высокотемпературного отжига.

Характеристика разряда: мощность плазмы 150—350 Вт, давление $2,7 \cdot 10^{-2}$ Па, температура осаждения 50—150°C, скорость осаждения 20—50 нм/мин, скорость травления в буферном травителе сформированной пленки ≤ 1 нм/мин.

Гомоэпитаксиальный рост пленок моно- и поликремния.

При осаждении моно- и поликремния из силана (дисилана) в СВЧ-реакторах электронно-циклотронного резонанса свойства пленок лучше свойств таких же пленок, сформированных термоионным осаждением. Это связано с тем, что в СВЧ ЭЦР-реакторах поток ионов до подложки без их сепарации преобладает над потоком нейтральных радикалов, поскольку с ростом частоты растет степень диссоциации и ионизации атомов и молекул реагентов. Поэтому водород, находящийся в высокочастотной плазме, легко геттерирует углерод и кислород (две критические примеси в монокремнии) как перед осаждением пленки, так и в процессе ее роста.

Плазменная гомоэпитаксия имеет преимущество перед газовой в том, что она осуществляется при значительно меньшей температуре и эпитаксиальные слои формируются на любой кристаллографической плоскости, например (100), без рассовмещения и автолегирования, как это имеет место в газовой высокотемпературной эпитаксии. Это говорит о том, что эпитаксиальный рост пленок происходит по разным механизмам: в плазменной — за счет большой скорости миграции ионов и нейтральных частиц по поверхности, а в газовой имеет место плоскостный механизм

формирования эпитаксиальной пленки. Это открывает большие возможности для локальной эпитаксии в трехмерных структурах на базе совмещенных Ви-К-Д-МОП-технологий.

Процесс плазменной гомоэпитаксии требует дальнейших исследований механизмов роста и методов легирования низкотемпературных эпитаксиальных слоев. Следует отметить, что дисилан увеличивает скорость роста, как минимум, в два раза. Сепарацию положительных ионов водорода можно проводить при отрицательном смещении, которое подается на сетку перед зоной послесвечения, или заменой силановой смеси на SiCl_4 , диссоциация которого на частоте 2,45 ГГц приближается к SiH_4 . Для увеличения скорости осаждения слоев монокремния до 25—35 нм/мин на Si-подложки подаются смещения ≤ -25 В. В этом случае плазменную гомоэпитаксию кремния можно осуществлять на Si-подложки любой ориентации при ИК-нагреве до 550—650°C.

Необходимая чистота поверхности задается плазмохимическим травлением с использованием хлористого водорода. Снижение температуры плазмы до 500°C ведет к осаждению поликремния, а при 300°C — к осаждению аморфного кремния.

Такая технология формирования гомоэпитаксиального кремния (ее называют еще графоэпитаксией) позволяет формировать высококачественные структуры SOI (silicon—oxide—isolation) на любой диэлектрической подложке при использовании быстрого фотонного отжига.

Заслуживает внимания плазменная технология гомоэпитаксии для формирования силицидной (полицидной) разводки. Это достигается подачей в реактор, кроме SiCl_4 , еще и TiCl_4 . При оптимальных режимах роста и давлении $\geq 5,3 \cdot 10^{-2}$ Па получена рекордная проводимость ($\leq 6,2 \cdot 10^{-6}$ Ом·см) при скорости роста 40—50 нм/мин, чего другими методами достичь практически невозможно. Проведенные исследования показывают, что такой метод формирования силицидных пленок с дополнительной сепарацией ионов кислорода позволяет выйти на уровень 0,3—0,4 мкОм·см и полностью исключить из субмикронной технологии БИС некоррозионностойкую металлизацию алюминием с шагом 1—1,5 мкм в многоуровневой коммутации. Высокая конформность покрытия достигается потенциалом смещения на Si-подложку ≤ -50 В.

Плазмохимическое травление меток совмещения в СВЧ ЭЦР-реакторах.

СВЧ ЭЦР-метод наиболее перспективен для технологии БИС, поскольку позволяет анизотропно формировать субмикронные размеры (0,5—0,6 мкм) благодаря направленному потоку ионов и радикалов низкой энергии (≤ 20 эВ). Такая низкая энергия позволяет достигать высокой селективности травления ($\geq 5—12$). Заслуживает внимания процесс плазмохимического травления меток совмещения в монокремнии с использованием высокочастотной плазменной технологии.

Для травления меток использовалась плазма $\text{SF}_6 + \text{Ar}$ при давлении $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па, смещении -50 В и мощности плазмы 600 Вт, что обеспечивает высокую скорость травления (200—320 нм/мин). Здесь ани-

зотропия приближается к 1,0 и полностью исключает боковой подтрав. Уже при давлении $\geq 4 \cdot 10^{-2}$ Па боковой подтрав возрастает до анизотропности 0,7—0,9, а селективность травления Si—SiO₂ составляет 5—8. Если в плазму ввести галогенные добавки в виде J, Br, Cl в пределах 2—8%, то скорость травления монокремния возрастает до 720—870 нм/мин при увеличении селективности до 11—12, а анизотропность возрастает до 1,0. Таким образом, качество меток совмещения определяется анизотропным плазмовым травлением и величиной высокочастотного смещения.

Травление диэлектрических слоев (SiO₂, Si₃N₄, Si_xO_yN_z, ФСС, БФСС) в ЭЦР-реакторах проводилось в плазме CF₄ или SF₆ при скорости травления в пределах 10—25 нм/мин. Для увеличения скорости травления таких диэлектрических пленок, как показали наши исследования, необходимо увеличить частоту напряжения смещения до величины $f \geq 25$ кГц (f_p 13,56 МГц), а напряжение смещения до $U_c \geq 90$ В. При этом скорость травления возрастает до ≥ 150 нм/мин, когда мощность плазмы увеличивается до ≥ 700 Вт. Скорость травления можно также увеличить до 180—200 нм/мин при анизотропности $\geq 0,95$, если заменить SF₆ на углеродные галогены типа C_nF_m при $n=1-4$ (C₃F₈).

Следует выделить особенности плазменного травления полиимидной изоляции в плазме CF₄+O₂ (8—20% O₂) при давлении 0,5—0,7 Па и мощности 300 Вт, при котором скорость травления составляет ≥ 250 нм/мин, а при мощности 600 Вт скорость возрастает уже до 700 нм/мин (13,56 МГц, $U_c \geq 70$ В) с селективностью больше 10 без увеличения дефектности функциональных слоев. Данный процесс эффективен также при профилировании контактных окон изменением анизотропности плазменного травления или при их формировании спейсерной технологией.

Поликремниевая спейсерная технология формирования субмикронных контактов БИС.

При переходе в субмикронный диапазон топологических норм до уровня 0,25—0,8 мкм особенно актуальной становится задача формирования профилированных контактов в многоуровневой разводке топологии БИС, где в качестве межслойной изоляции используют как низкотемпературное боросиликатное стекло (БФСС), так и планаризирующие полиимидные композиции [4, 5].

Основным компонентом данной технологии является низкотемпературное осаждение функциональных слоев (легированного и нелегированного поликремния, оксида кремния, БФСС) на основе силановой технологии в реакторе пониженного давления типа "Изотрон". Оплавление межслойной изоляции на основе БФСС осуществляется термокомпрессионным окислением в реакторе установки "Термоком". Заданный профиль стенок контактов формируют изменением мощности разряда и давления в реакционной камере циклотронного плазмохимического травления в зоне послесвечения [5].

Маршрут формирования таких профилированных субмикронных контактов включает в себя:

— формирование БФСС для межслойной изоляции с буферным подслоем оксида (400 Å);

— оплавление межслойной изоляции БФСС термокомпрессионным окислением при температуре 650°C и давлении 30 атм.;

— нанесение двухслойной пленки нелегированного поликремния и пленки диоксида SiO₂ толщиной $\leq 0,3$ и $\leq 0,1$ мкм, соответственно;

— анизотропное плазмохимическое травление двухслойной пленки поли-Si—SiO₂ в местах контактов;

— нанесение пленки нелегированного поликремния толщиной $\leq 0,3$ мкм для формирования спейсеров;

— формирование боковых спейсеров высокочастотным плазменным травлением поликремния в местах контактов;

— анизотропное плазмохимическое травление и профилирование межслойной изоляции в виде БФСС в объемном реакторе ЭЦР;

— металлизация контактов алюминиевым сплавом "алюминий—кремний—РЗМ" или дисилицидом титана (TiSi₂), сформированным на основе аморфного кремния.

Межслойную изоляцию можно формировать низкотемпературным осаждением полиимидной композиции типа ПИД по аналогии с пленкой фоторезиста. Тогда исключаются операции формирования БФСС и его оплавления.

Модель газофазного осаждения аморфного, легированного и нелегированного поликремния, БФСС, SiO₂, TiSi₂ в реакторе пониженного давления (РПД) определяется приведенной скоростью осаждения пленки [5]:

$$V = ST(P_x + P_y) / (C_0 P_\Sigma (D_p^2 - D^2)), \quad (2)$$

где S , T — скорость откачки и температура осаждения реактора РПД;

P_x , P_y — давление реагентов диффузанта и окислителя, соответственно;

C_0 — концентрация силановой смеси в аргоне;

P_Σ — общее давление в реакторе;

D_p , D — диаметры реактора и кремниевых пластин, соответственно.

Для обеспечения диффузионного перемешивания компонентов в процессе осаждения пленок функциональных слоев проводится импульсное легирование газовой смеси одним из компонентов (фосфин, хлористый фосфор, диборан, хлористый титан) с использованием специального сопла в реакторе пониженного давления установки "Изотрон" и специальных кассет с обтекателями. Угол наклона стенок контактов при профилировании формируют при помощи анизотропного плазменного травления в ЭЦР-реакторах на установках типа GIR-820 (500) в пределах от 90 до 60° изменением мощности разряда и давления в зоне послесвечения. Слой нелегированного поликремния используется как маска для формирования контактных спейсеров.

Высококонтрастное плазменное проявление в оптической проекционной литографии.

Оптическая литография с высокой разрешающей способностью для формирования топологии БИС основана на проекционных системах и высококонтрастном резисте [6]. Система проекционного совмещения обеспечивает перенос топологических

элементов до 0,8 мкм и при переходе к размерам 0,25—0,8 мкм ограничивается следующими факторами:

— неплоская отражающая поверхность кремниевых пластин с топологией БИС приводит к двум эффектам, которые ограничивают разрешающую способность: объемный эффект, который состоит в искажении переносимого изображения, вызванном разной толщиной резиста вблизи резкого изменения рельефа поверхности; многократное отражение экспонирующего освещения от Si-пластины, что приводит к образованию стоячих волн;

— отсутствием высокого γ -контраста у резиста ($\geq 4,0$) и высококонтрастного проявления проэкспонированного изображения.

Для устранения этих оптических явлений нами разработан позитивный высококонтрастный однокомпонентный резист, который обеспечивает γ -контраст $\geq 8,5$ —10, позволяющий формировать проекционной литографией с использованием высокочастотного плазменного кислородного проявления топологические размеры 0,5—0,8 мкм. Такое проявление высококонтрастного резиста обеспечивает анизотропность его пленки на уровне 1,0 при селективности травления экспонированной и неэкспонированной областей в пределах 18—28. Дополнительное силилирование проэкспонированной пленки резиста перед проявлением в HMDS (гексаметилдисилазан) увеличивает его разрешающую способность, как минимум, в 1,5—2 раза и позволяет получить топологические размеры 0,5—0,6 мкм [6]. При этом анизотропность проявления регулируется мощностью плазменного разряда, а кислородное проявление, проведенное в зоне послесвечения объемного реактора ЭЦР, обеспечивает высокую скорость проявления (200—900 нм/мин) при потенциале смещения -50 — -150 В и давлении $5 \cdot 10^{-2}$ — $6,5 \cdot 10^{-1}$ Па (мощность плазмы 250—380 Вт).

Таким образом, высокочастотное плазменное проявление дает возможность сместить оптический диапазон проекционной литографии до воспроизведения размеров 0,25—0,8 мкм.

Диагностирование плазмохимических процессов

При переходе в субмикронный диапазон актуальным становится диагностирование плазменных процессов как осаждения, так и качественного травления функциональных слоев с точной фиксацией окончания процесса травления [7—9]. Для этого используется целый арсенал различных физических методов.

Нами разработана компьютерная система, которая позволяет вести непосредственно диагностику плазменных процессов (*in situ*) с использованием эмиссионной, масс-, оже-спектроскопии и лазерной интерферометрии, которые обеспечивают высокую информативность. Во-первых, эмиссионные полосы определенных реагентов или продуктов реакций могут регистрироваться с целью определения момента завершения процесса травления. Так, для травления поликремния с высокой селективностью используют SF_6 , CF_4+O_2 , для которых окончание процесса фиксируется по линиям F как реагента с длиной волны 704 нм и CO как продукта реакции с длиной волны

298, 484, 520 нм, а для травления S_3N_4 или $Si_xO_yN_z$ при использовании хладона-218 ($C_3F_8+O_2$) фтор как реагент фиксируется на длине волны 704 нм, CN как продукт фиксируется уже на длине 674 нм и N_2 как продукт — на длине 387 нм. Во-вторых, эмиссионные полосы 1106, 1225, 515 cm^{-1} изоконцентрационной примеси кислорода в монокремнии (Ч) отображают качественное плазменное вскрытие контактов.

Изменение давления или мощности в момент окончания процесса травления в зоне послесвечения связано с изменением эмиссионной амплитуды (пика) примеси на длинах волн, характерных для реагентов, которые входят в состав пленки. Эта связь позволяет диагностировать окончание процесса травления.

Особенно высокую наглядность дают масс-спектрограммы, которые эффективно отображают продукты реакций процессов травления. Реагенты и продукты реакций фиксируются количественно и качественно, что позволяет контролировать протекание процесса во времени. Так, при травлении Si_3N_4 в плазме SF_6 на масс-спектрограмме наблюдаются изменения пиков (амплитуд), при отсутствии же травления или осаждения таких изменений не наблюдается (например, продуктов реакции N_2^+ и SiF_3^+).

Высокую информативность плазменных процессов осаждения и травления обеспечивают разработанные диагностические методы с использованием инфракрасной и лазерной интерферометрии, с помощью которых легко прослеживается кинетика роста или травления функциональных слоев БИС.

Данные методы эффективно дополняет оже-спектроскопия. Современные оже-спектрометры 09 ИОС-3 и 09 ИОС 10-005 позволяют анализировать поверхность с высокой чувствительностью и разрешением с точностью 1—3%. Нами этот метод использован для диагностики плазмохимических процессов травления моно- и поликремния, диоксида кремния, нитрида и оксинитрида, фосфоро- и борофосфоросиликатного стекла, силицидов и полицидов, алюминиевых сплавов с использованием хладона 14 (CF_4), хладона 218 (C_3F_8) и хладона 23 (CHF_3), элегаза SF_6 на установках 08 ПХО-100Т-005, -006, -007, -008, GIR 820. Проведенные экспериментальные исследования показывают, что из использованных реагентов максимальную чистоту и селективность травления диоксида кремния обеспечивает хладон 23 при использовании объемного ЭЦР-реактора установки GIR 820.

Концентрацию электронов в плазме и ее температуру определяют электрофизическим диагностированием при помощи зонда Ленгмюра согласно выражению [9]

$$I_e = 1/4n_e e [(8kT_e)/(\pi m_e)]^{1/2} A \exp(eU_c / kT_e), \quad (3)$$

где n_e , m_e , e — плотность, масса и заряд электронов;
 k — постоянная Больцмана;
 T_e — температура электронов;
 A — площадь зонда Ленгмюра;
 U_c — напряжение смещения на зонде.

Потенциал плазмы является одним из главных параметров при плазменном травлении, где ускоряющее напряжение влияет как на профиль, так и на селективность травления. Измерения, проведенные при помощи зонда Ленгмюра, показали, что с использованием элегаза SF₆ плотность плазмы составляет 10¹⁰—10¹² см⁻³, а потенциал плазмы составляет 5—9 В при мощности 300 Вт и 26—30 В уже при мощности 700 Вт. Кроме плотности ионного тока, на скорость и селективность травления, как видим, влияет энергия ионов. Малая величина потенциала плазмы (5—20 В) обеспечивает низкое дефектообразование — меньше 0,05 см⁻².

Энергию ионов можно изменять подачей на подложкодержатель напряжения смещения (0...—100 В). При напряжении смещения в пределах -50...—100 В анизотропия достигает значения 1,0, а ионный ток, которым обеспечивается травление, состоит целиком из положительных ионов. При уменьшении потенциала возрастает электронная составляющая, которая уменьшает вертикальную составляющую скорости травления в SF₆, что связано с увеличением скорости десорбции F на кремниевые пластины.

Таким образом, высокочастотные плазменные процессы осаждения и травления с использованием зоны послесвечения объемных реакторов ЭЦР благодаря отсутствию теплового действия и радиационных повреждений дают возможность в субмикронной технологии БИС реализовать топологические размеры 0,25—0,8 мкм, снизить дефектность функциональных слоев до уровня ≤0,05 см⁻² и увеличить зарядовую стабильность межфазной границы раздела Si—SiO₂, которая оценивается нестабильностью порогового напряжения и напряжения плоских зон.

Варьирование давления и мощности плазменного травления позволяет изменять как анизотропность, так и селективность травления, что может успешно использоваться в спейсерной технологии формирования и профилирования контактных окон.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Кузнецов В. И., Солнцев С. А. Моделирование влияния режимов процесса на скорость травления вне зоны плазмы // Физика и химия обработки материалов.— 1992.— № 2.— С. 114—122.
2. Durandet A. Distributed electron cyclotron resonance reactory: a vable concept for intergrated circuit etching // Microelectronic. Manufacturing and Testing.— 1989.— N 5.— P. 26—28.
3. Новосядлый С. П. Плазмохимические процессы в системной технологии БИС // Вестн. Харьковс. ун-та. Сер. Физическая. Ядра, частицы, поля.— 1999.— № 453, вып. 3.— С. 61—68.
4. Новосядлый С. П. Физико-технологические особенности плазмохимических процессов субмикронной системной технологии БИС // Теоретическая электротехника.— 2000.— № 55.— С. 21—27.
5. Новосядлий С. П. Полікремнієва спейсерна технологія формування субмікронних контактів великих інтегральних схем // Труды 2-й Междунар. науч.-практ. конф. “Современные информационные и электронные технологии”.—Одесса.— 2001.— С. 263—264.
6. Новосядлый С. П., Курило И. В. Физико-химические особенности субмикронной оптической литографии БИС // Вестн. НУ “Львовская политехника”. Химия, технология веществ и их применение.— 2000.— № 395.— С. 78—82.
7. Flam D. L. Trends in plasma sources and etching // Solid State Technology.— 1991.— Vol. 34, N 3.— P. 47—50.
8. Новосядлый С., Иванцив Н., Иванцив В. Особенности и модели травления в субмикронной технологии БИС // Вестн. НУ „Львовская политехника”. Компьютерные системы проектирования. Теория и практика.— 2002.— № 444.— С. 48—56.
9. Новосядлый С. П. Технологический САПР на основе тестовых структур // Физика и химия твердого тела.— 2002.— Т. 3, № 2.— С. 148—159.

К. т. н. Г. И. ГАВРИЛЮК, В. В. СЕВАСТЬЯНОВ,
Л. М. БОНДАРЧУК, В. В. ЧЕЧЕЛЬ

Украина, г. Винница, НИИ “Гелий”
E-mail: lctec@svitonline.com

Дата поступления в редакцию
24.09 2002 г.

Оппонент д. т. н. В. С. ОСАДЧУК
(ВГТУ, г. Винница)

СИЛОВАЯ МИКРОСХЕМА ДЛЯ БЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ СВЕТА

Предложена схема управления высоковольтными инверторами, создана силовая микросхема для энергосберегающей техники, работающей в сложных климатических условиях.

В настоящее время в энергосберегающей технике широко применяются электронные преобразователи, работающие по схеме с высоковольтными инвертора-

ми на базе МОП-транзисторов [1]. Указанная схема включает в себя генератор с частотой до 100 кГц и высоковольтный (600 В) драйвер, который формирует выходные сигналы с паузой до 1,2 мкс, что позволяет гальванически связать транзисторы драйвера с силовыми транзисторами и обеспечить устойчивое функционирование электронного преобразователя.

Существует проблема обеспечения надежности в эксплуатации электронных преобразователей из-за проявления эффекта «защелкивания» выходных тран-