

СПЕЦИАЛЬНОЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА МИКРОСХЕМ КРИТЕРИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ И КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ

В. Берлин, В. Киреев, д.т.н., valerikireev@mail.ru, Д. Челапкин

Эффективность и конкурентоспособность специального технологического оборудования (СТО) для производства интегральных микросхем (ИМС) или других изделий микроэлектроники определяется себестоимостью (совокупностью общих затрат) единицы продукции операции, реализуемой на оборудовании. В свою очередь себестоимость продукции, изготавливаемой на СТО, зависит как от характеристик установки и проводимой на ней операции, так и от задаваемых государством цен, налогов, пошлин. Так каковы же составляющие себестоимости? Каковы возможности и особенности создания в России конкурентоспособного на мировом рынке СТО? Каковы критерии энергетической эффективности установок, систем и процессов? Попробуем дать ответы на эти вопросы на примере СТО для реализации вакуумно-плазменных технологических процессов.

Себестоимость (Cost Of Manufacture, COM) операций изготовления микросхем или микроэлектронных изделий рассчитывается согласно стандарту SEMI E35 [1] по формулам:

$$COM = (F_c + R_c + L_c) / (t_{cal} \cdot U \cdot N \cdot Y_w), \quad (1)$$

долл./пластина

$$COM = (F_c + R_c + L_c) / (t_{cal} \cdot U \cdot N \cdot Y_w \cdot Y_{c/w}), \quad (2)$$

долл./кристалл,

где F_c – фиксированные расходы за срок службы оборудования (время жизни оборудования или время полной амортизации его стоимости обычно принимается равным пяти годам), используемого в производстве изделий. Включают стоимость самого оборудования, затраты на его установку, технологические испытания, на обучение персонала, установку системы экологической безопасности (скруббера или фильтра) и стоимость площади помещения, занимаемого оборудованием;

R_c – периодические расходы за срок службы оборудования на производство изделий. Включают стоимость расходных материалов, реагентов, электроэнергии, запчастей,

затраты на обслуживание и заработную плату, а также затраты на расходные материалы, энергоносители и обслуживание системы экологической безопасности;

L_c – расходы за срок службы оборудования на потери изделий (пластин и кристаллов) в результате их повреждения (поломок, загрязнений), которые непосредственно связаны с уровнем совершенства характеристик оборудования;

t_{cal} – общее календарное время работы оборудования (в часах) за срок его службы;

t_{pr} – время, в течение которого оборудование обрабатывает пластины;

U – коэффициент использования оборудования, равный t_{pr}/t_{cal} (значение U для эффективного производства обычно составляет 85%);

N – производительность оборудования, измеряемая числом обрабатываемых пластин в час;

Y_w – выход годных пластин с оборудования;

$Y_{c/w}$ – выход годных кристаллов с пластины (chips per wafer).

Суммарная экономическая эффективность операций и оборудования при производстве изделий микроэлектроники, задаваемая формулами (1) и (2), зависит от двух факторов:

- параметров установки и проводимой на ней операции, зависящих от опыта, квалификации и таланта ученых, конструкторов и технологов;
- показателей, определяемых государством, к которым относятся цены, налоги и пошлины на потребляемые расходные материалы, реагенты, тепловую и электрическую энергию, а также налоги на заработную плату и выпускаемую продукцию, налоги и/или арендная плата за помещения и землю.

Поскольку себестоимость микроэлектронной, а в принципе и любой, продукции зависит от технических параметров оборудования и государственно-финансовых показателей, можно выделить две особенности развития высокотехнологичного производства в России.

Первая – более высокая себестоимость изготовления изделий на новой отечественной установке, чем на импортных аналогах, несмотря на то, что отечественная установка по техническим и технологическим параметрам может превосходить импортные на 20%. Это связано с более высокими (более чем на 20%) ценами, налогами и пошлинами на используемые материалы, реагенты и инфраструктуру в сравнении с зарубежными. Таким образом, несмотря на техническое и технологическое совершенство новая отечественная установка не будет конкурентоспособной на мировом рынке и не сможет стать основной конкурентоспособного производства изделий в России. Обычные меры, предпринимаемые для выхода из такого положения: продажа патента зарубежной конкурирующей компании, заключение с разработчиками установки контракта на работу за рубежом в конкурирующей компании или покупка установки инвесторами с организацией производства за рубежом.

Вторая особенность заключается в том, что при закупке импортного оборудования и технологии для производства микроэлектронных изделий российское предприятие вынуждено покупать кремниевые пластины, расходные материалы и реагенты за рубежом. В результате с учетом налога на добавленную стоимость и таможенных пошлин отечественная продукция микроэлектроники в лучшем случае на 30% дороже мировых аналогов. Российскую политику в области развития собственного производства оборудования и изделий в сфере высоких технологий оставим на профессиональной репутации и совести государственных чиновников. Подчеркнем при этом, что правительства всех

промышленно и информационно развитых стран мира всегда оказывали помощь (налоговыми и таможенными льготами, дотациями и т.п.) своим высокотехнологичным компаниям для выхода на мировые рынки.

Для характеристики технической и технологической эффективности оборудования и операций производства ИМС можно ввести следующие критерии.

1. Энергетическая эффективность установки и проводимой на ней операции α_{te} , определяемая отношением числа годных пластин или кристаллов, обработанных на установке в единицу времени, к значению потребляемой ею электрической мощности W_t :

$$\alpha_{te} = (N \cdot Y_w) / W_t, \text{ пластин/кВт}\cdot\text{ч}, \quad (3)$$

$$\alpha_{te} = (N \cdot Y_w \cdot Y_{c/w}) / W_t, \text{ кристалл/кВт}\cdot\text{ч}. \quad (4)$$

2. Эффективность использования газа (реагента) в ходе проводимой операции α_{tg} , равная отношению числа годных пластин или

Таблица 1. Энергетическая эффективность и эффективность использования рабочего газа трех установок безрадиационного удаления ФР в потоке ХАЧ

Параметры	Модель		
	Aspen II Strip компании Mattson Technology, США	BobCat 208 компании Matrix Integrated Systems, США	Плазма 150А ОАО "НИИПМ", Воронеж, Россия
Год выпуска	1996	2000	2002
Потребляемая мощность W_t , кВт	10	12	10
Используемый рабочий газ	Кислород (или смесь кислород-азот)		
Расход рабочего газа Q_t , л/ч	240–480		
Рабочее давление p , Па	67–266		
Используемый источник ПВП	На основе индукционно-связанной плазмы (ICP)	На основе микроволновой плазмы (MWP)	На основе индукционно-связанной плазмы (ICP)
мощность, W_s Вт	1200	3000	1200
частота f , МГц	13,56	2450	13,56
Диаметр обрабатываемых пластин D_w , мм	100–200	100–200	100–150
Скорость удаления ФР v_{et} , мкм/мин	7,7	7,7	3,2
Неравномерность скорости удаления ФР со 150-мм пластины $\gamma(v_{et})$, %	$\pm 3,0$ (3 σ)	$\pm 3,0$ (3 σ)	$\pm 3,5$ (3 σ)
Технологическая производительность N , пластин/ч	120	120	50
Выход годных пластин с установки Y_w , б/р	0,9999		
Температура подложкодержателя T_s , °С	25–275	25–300	60–300
Энергетическая эффективность установки α_{te} , пластин/кВт·ч	12,05	10,00	5,00
Эффективность использования рабочего газа в установке α_{tg} , пластин/л	0,33	0,33	0,14
Энергетическая эффективность плазменной системы по удалению ФР со 15-мм пластины α_{set} , г/Дж	$1,875 \cdot 10^{-6}$	$0,750 \cdot 10^{-6}$	$0,779 \cdot 10^{-6}$

* Технологическая производительность определялась для операции формирования наносимого на пластину слоя фоторезиста толщиной 1 мкм и плотностью 1 г/см³, задубленного при температуре 100°С.

** Выход годных пластин с установки принимался равным 0,9999 для всех установок, т.е. из 10 тыс. обработанных на установке пластин допустим брак (поломка или загрязнение) одной пластины.

кристаллов, обработанных на установке в единицу времени, к объему расходуемого газа (реагента) Q_t , подводимого к установке:

$$\alpha_{tg} = (N \cdot Y_w) / Q_t, \text{ пластин/л}, \quad (5)$$

$$\alpha_{tg} = (N \cdot Y_w \cdot Y_{wc}) / Q_t, \text{ кристалл/л}. \quad (6)$$

Расход подводимого к установке газа Q_t при давлении p и температуре T измеряется в стандартных литрах в час и определяется по формуле $Q_t = Q_{st} \cdot p_{st} \cdot T / (p \cdot T_{st})$, где Q_{st} – расход газа при

стандартных условиях - $p_{st}=1$ атм. (101325 Па) и $T_{st}=25^{\circ}\text{C}$ (298,16К).

По формулам (5) и (6) можно определять эффективность (т.е. рассчитывать расход газа на одну годную пластину или кристалл) использования различных газов и реагентов в виде пара и жидкости, а также эффективность применения охлаждающих жидкостей (например, деионизованной воды) и вспомогательных газов (например, сжатого воздуха). Расход твердых материалов, например мишеней для магнетронного распыления, определяется, исходя из числа годных пластин или кристаллов на единицу массы (например, 1 г) расхода мишени.

Для оценки эффективности использования газов и реагентов рассмотрим операционные и технологические параметры трех установок безрадиационного удаления фоторезиста (ФР) в потоке химически активных частиц (ХАЧ), генерируемых источником плазмы высокой плотности (ПВП) (high density plasma, HDP), при поштучной обработке пластин (табл.1) [2-4].

В отличие от обычной плазмы, в которой концентрация электронов (n_e) и ионов (n_i) лежит в диапазоне (10^9 - 10^{10}) см^{-3} , концентрация заряженных частиц в ПВП $n_e = n_i \geq 10^{11}$ см^{-3} . Причем системы с ПВП могут работать в очень широком диапазоне давлений - от сотен единиц до десятых долей паскаля (Па) [5]. В установках, рассмотренных в табл.1, источники генерируют ПВП при давлениях 67-266 Па.

Как видно из табл.1, энергетическая эффективность установки удаления фоторезиста Aspen II Strip больше, а эффективность использования рабочего газа та же, что и установки удаления фоторезиста VobCat 208. Тогда как отечественная установка Плазма 150А значительно уступает обеим зарубежным системам по этим показателям.

За время эксплуатации (за срок службы) оборудование удаления фоторезиста обычно обрабатывает около 5 млн. пластин. Таким образом, установка Aspen II Strip по сравнению с установкой Плазма 150А за срок службы потратит на $585 \cdot 10^3$ кВт·ч и на $20,55 \cdot 10^3$ кубометров газа (или на 3400 40-литровых 150-атмосферных баллонов) меньше, что в денежном выражении составит экономию в десятки миллионов рублей.

Особенно наглядно более детальное сравнение установок Aspen II Strip и Плазма 150А, так как в них используются одинаковые источники на основе индукционно-связанной плазмы высокой плотности, которую генерируют ВЧ-генераторы

одинаковой мощности $W_s=1200$ Вт и частоты $f=13,56$ МГц. При этом используется один и тот же рабочий газ с одинаковыми диапазонами расхода и рабочего давления. Одинаков и диапазон температуры подложкодержателя (см. табл.1). В рассматриваемых установках пленка органического фоторезиста удаляется с помощью спонтанных реакций ХАЧ (свободных атомов и радикалов), к которым в первую очередь относится атомарный кислород O^{\bullet} (атомарный кислород с двумя неспаренными валентными электронами). O^{\bullet} образуется в результате диссоциации молекулы озона O_3 при адсорбции на поверхности материалов, согласно реакции $O_3 = O_2 + O^{\bullet}$ [6]. Скорость спонтанного химического травления (СХТ) материала в результате химической реакции в режиме не лимитированной доставки ХАЧ определяется как [7, 8]:

$$v_{et} = \epsilon_{cr} \cdot Y_{cr} \cdot q_r / \sigma_m = \epsilon_{cr} \cdot Y_{cr} \cdot n_r \cdot (k \cdot T_r / 2 \cdot \pi \cdot m_r)^{1/2} / \sigma_m, \text{ см/с}, \quad (7)$$

где $\epsilon_{cr} = c_{cr} \cdot \exp(-E_{act}/k \cdot T_m)$ - вероятность спонтанной химической реакции; Y_{cr} - коэффициент удаления материала в результате спонтанной химической реакции травления (атом/ХАЧ) (для реакции $C + 2O^{\bullet} \rightarrow CO_2$ $Y_{cr} = 0,5$ атом/ХАЧ); $\sigma_m = (\rho_m \cdot N_A) / A_m$ - атомная плотность материала (атом/ см^3); $q_r = 1/4 n_r v_r$ - плотность потока ХАЧ, падающего на поверхность материала в единицу времени, (ХАЧ/ $\text{см}^2 \cdot \text{с}$); c_{cr} - предэкспоненциальный множитель, независимый от температуры; T_m - температура поверхности обрабатываемого материала (в хорошо сконструированных системах эта температура практически не отличается от температуры подложкодержателя, т.е. $T_m = T_s$); k - постоянная Больцмана; E_{act} - энергия активации спонтанной химической реакции травления; ρ_m и A_m - плотность (г/см^3) и атомная масса (г/моль) материала, соответственно; N_A - число Авогадро (атом/моль); n_r и $v_r = (8k \cdot T_r / \pi \cdot m_r)^{1/2}$ - концентрация ХАЧ (ХАЧ/ см^3) и их средняя тепловая скорость (см/с), соответственно; T_r и m_r - температура и масса ХАЧ, соответственно.

Для выявления различий в процессах и плазменных системах СХТ установок Aspen II Strip и Плазма 150А введены следующие критерии.

1. Энергетическая эффективность процесса СХТ α_{pet} , определяемая как отношение массы вещества (m_{pet}), удаляемого в единицу времени с единицы площади обрабатываемого материала, к плотности мощности w_{pet} , затрачиваемой на реализацию процесса травления:

$$\alpha_{pet} = m_{pet} / w_{pet}, \text{ г/Дж}, \quad (8)$$

где масса вещества m_{pet} , удаляемого в единицу времени с единицы площади, определяется как

$$m_{pet} = v_{et} \cdot \rho_m, \text{ г/}(см^2 \cdot с), \quad (9)$$

а плотность мощности w_{pet} , затрачиваемая на реализацию процесса СХТ материала, как

$$w_{pet} = q_r \cdot 2 \cdot k \cdot T_r, \text{ Вт/см}^2 \text{ [9]}. \quad (10)$$

Подставляя выражения (9) и (10) в формулу (8), получим:

$$\alpha_{pet} = v_{et} \cdot \rho_m / w_{pet} = v_{et} \cdot \rho_m / (2q_r \cdot k \cdot T_r). \quad (11)$$

2. Энергетическая эффективность плазменной системы СХТ α_{set} – отношение массы вещества (m_s), удаляемого ХАЧ в единицу времени с площади обрабатываемого материала S_w , к подводимой к системе электрической мощности W_s :

$$\alpha_{set} = m_s / W_s = v_{et} \cdot \rho_m \cdot S_w / W_s, \text{ г/Дж}. \quad (12)$$

С учетом того, что $m_s = m_{pet} \cdot S_w = \alpha_{pet} \cdot w_{pet} \cdot S_w = \alpha_{pet} \cdot W_{pet}$, где W_{pet} – мощность, затрачиваемая на реализацию процесса СХТ материала, уравнение (12) можно записать в виде:

$$\alpha_{set} = \alpha_{pet} \cdot W_{pet} / W_s. \quad (13)$$

Из выражения (13) следует, что энергетическую эффективность плазменной системы СХТ определяет произведение энергетической эффективности реализуемого в ней процесса спонтанного химического травления (α_{pet}) на коэффициент преобразования подводимой к системе мощности в мощность, непосредственно затрачиваемую на процесс СХТ материала $\chi = W_{pet} / W_s$.

Из приведенных в табл.1 значений энергетической эффективности плазменной системы, рассчитанных по формуле (12), следует, что энергетическая эффективность установки Aspen II Strip в 2,4 и в 2,5 раза выше, чем установок Плазма 150А и BobCat 208, соответственно. Следует особо подчеркнуть, что, несмотря на более высокую энергетическую эффективность плазменной системы установки Плазма 150А в сравнении с плазменной системой на основе микроволновой плазмы (MWP) установки BobCat 208, эффективность использования электроэнергии и рабочего газа в целом у установки BobCat 208 значительно выше (см. табл.1). Это означает, что в отечественной

установке используется более энерго- и материалоемкие компоненты (насосы, приводы, клапаны, нагреватели, блоки питания и др.), а покрытие внутрикамерных элементов в плазменной и реакционной зонах не оптимально.

Различие энергетической эффективности плазменных систем рассматриваемых установок может быть обусловлено двумя причинами. Во-первых, разными значениями коэффициента преобразования χ . Во-вторых, применением различных материалов покрытий внутрикамерных элементов реакторов, которые определяют скорость гибели и концентрацию ХАЧ в зонах генерации плазмы и обработки пластин [10].

Подставив выражение (7) в формулу (11) и проведя преобразования, получим:

$$\alpha_{pet} = b \cdot (\exp[-E_{act}/k \cdot T_m] / T_r), \quad (14)$$

где $b = c_{ct} \cdot Y_{ct} \cdot A_m / (2 \cdot k \cdot N_A)$ (г·К/Дж) – коэффициент, независимый от температуры обрабатываемого материала T_m и от температуры ХАЧ T_r .

Из выражения (14) следует, что энергетическая эффективность процесса СХТ материала зависит от энергии активации реакции спонтанного травления материала конкретным ХАЧ E_{act} , температуры материала T_m и температуры ХАЧ T_r .

Источники генерации как обычной плазмы, так и плазмы высокой плотности (ПВП) могут быть также успешно использованы для проведения процессов ионного (физического) распыления и травления различных материалов. Сравнение энергетической эффективности такого процесса в различных системах ионного распыления и травления (ИРТ), а также энергетической эффективности самих систем ИРТ можно провести, используя два основных критерия [11].

1. Энергетическая эффективность процесса ионного распыления (ion sputtering process) α_{pis} , определяемая массой вещества m_{pis} , распыляемого в единицу времени с единицы площади, отнесенной к плотности мощности w_{pis} , затрачиваемой на реализацию процесса распыления

$$\alpha_{pis} = m_{pis} / w_{pis}, \text{ г/Дж}. \quad (15)$$

Значение

$$w_{pis} = j_i \cdot U_i \text{ [Вт/см}^2\text{]}, \quad (16)$$

где j_i – плотность ионного тока на поверхности распыляемого материала (А/см²); U_i – напряжение,

Таблица 2. Расчетные значения энергии E_i^* наиболее широко используемых в микроэлектронном производстве материалов при их распылении ионами аргона [11]

Распыляемый материал	C	Al	Si	Ti	Cr	Cu	Ni	Ge	Nb	Mo	Ta	W	Au	Pt
Значение энергии E_i^* , эВ	310	320	330	330	340	350	360	360	380	390	440	450	450	460

ускоряющее ионы (В). Энергия бомбардирующих материал однозарядовых ионов равна $E_i = e \cdot U_i$, где e – заряд электрона (Кл).

В случае распыления материала однозарядовыми ионами

$$m_{pis} = Y_s(E_i) \cdot A_m \cdot j_i / (N_A \cdot e), \text{ г/с}\cdot\text{см}^2, \quad (17)$$

где $Y_s(E_i)$ – коэффициент распыления (КР) при энергии ионов E_i (атом/ион); A_m – атомная масса материала (г/моль); N_A – число Авогадро (атом/моль). Подставляя выражения (16) и (17) в формулу (15), получим:

$$\alpha_{pis}(E_i) = [Y_s(E_i)/E_i] \cdot [A_m/N_A], \text{ г/Дж}. \quad (18)$$

Из выражения (18) следует, что энергетическая эффективность процесса ионного распыления определяется зависимостью КР от энергии ионов и обратно пропорциональна самой энергии ионов. Расчетные [11] и экспериментально полученные [12] зависимости $Y_s(E_i)/E_i$ и $\alpha_{pis}(E_i)$ от энергии ионов аргона при распылении любых материалов имеют максимум в диапазоне энергий $(4,8-8,0) \cdot 10^{-17}$ Дж или 300–500 эВ. Это означает, что в этом диапазоне энергетическая эффективность процесса ионного распыления максимальна, т.е. максимальна доля энергии ионов, расходуемой на процесс распыления материала. Увеличение энергии ионов выше этого диапазона вызывает рост КР материала, но доля энергии, расходуемой на процесс распыления, уменьшается в большей степени, и в результате энергетическая эффективность процесса распыления снижается. Такие зависимости наблюдаются при распылении различных материалов разными ионами и являются общими энергетическими характеристиками процесса ионного распыления.

Значение энергии ионов E_i^* , которое соответствует максимальной энергетической эффективности процесса ионного распыления материала (табл.2), по расчетам ученых Исследовательского центра Министерства

энергетики США – Аргонской национальной лаборатории, – равно [13]:

$$E_i^* = 515 \cdot [a^2 \cdot Z_i \cdot Z_a \cdot (m_i + m_a)] / m_a, \quad (19)$$

где $a = 0,8853 \cdot a_0 \cdot (Z_i^{2/3} + Z_a^{2/3})^{-1/2}$ – характерный радиус экранирующего электронного облака по модели Томаса-Ферми; $a_0 = 5,29 \cdot 10^{-11}$ (м) – радиус атома водорода по Бору; Z_i, Z_a, m_i, m_a – атомные номера и массы бомбардирующего иона и атома распыляемого материала (материала мишени), соответственно. Полученные значения хорошо согласуются с экспериментальными данными [7, 12, 14, 15].

2. Энергетическая эффективность системы ионного распыления (system ion sputtering) α_{sis} определяется как отношение массы вещества, распыляемого в единицу времени с площади S_w обрабатываемого в системе материала m_{sis} , к подводимой электрической мощности W_s :

$$\alpha_{sis} = m_{sis} / W_s, \text{ г/Дж}. \quad (20)$$

С учетом того, что $m_{sis} = m_{pis} \cdot S_w = \alpha_{pis} \cdot w_{pis} \cdot S_w = \alpha_{pis} \cdot j_i \cdot U_i \cdot S_w = \alpha_{pis} \cdot I_i \cdot U_i$, где I_i – ионный ток распыляемого в системе материала, формулу (20) можно переписать в виде:

$$\alpha_{sis} = \alpha_{pis}(E_i) \cdot [I_i \cdot U_i / W_s]. \quad (21)$$

Из выражения (21) следует, что энергетическая эффективность системы ИРТ зависит от произведения энергетической эффективности реализуемого в ней процесса распыления (α_{pis}) на коэффициент преобразования подводимой к системе мощности в мощность, непосредственно затрачиваемую на процесс распыления ($\beta = I_i \cdot U_i / W_s$). Из-за разных операционных параметров и конструкций систем ИРТ значения ионного тока и ускоряющего ионы напряжения могут быть различными при одинаковых значениях подводимой к системе мощности.

Анализ источников обычной плазмы [11] показал, что сегодня из всех систем ИРТ наибольшая энергетическая эффективность у магнетронных систем постоянного тока $\alpha_{sis} = (2,1-2,3) \cdot 10^{-6}$ г/Дж

по меди. В этих системах максимальная энергетическая эффективность процесса ионного распыления материала $\alpha_{pis} = (3,0-3,8) \cdot 10^{-6}$ г/Дж по меди сочетается с высоким коэффициентом преобразования подводимой к системе мощности в мощность, затрачиваемую на процесс распыления $\beta = 0,6-0,7$.

В середине 1990-х годов необходимость увеличения скорости распыления (или травления), т.е. плотности ионного тока на мишень (или подложку), а также требование повышения анизотропии и качества обработки функциональных слоев привели к замене традиционных источников плазмы. Так, вместо ВЧ емкостных и магнетронных систем, работающих при давлениях в диапазоне 5,0-50 Па, стали применять источники ПВП ($> 10^{11}$ см⁻³), создаваемой при давлениях менее 1 Па. Сегодня подобные источники ПВП классифицируются на следующие основные группы [5]:

- системы на основе СВЧ или микроволновой плазмы на электронном циклотронном резонансе (ЭЦР) (Electron Cyclotron Resonance, ECR). К ним относятся также источники на распределенном ЭЦР (Distributed Electron Cyclotron Resonance, DECR) и источники на однородном распределенном ЭЦР (Uniform Distributed Electron Cyclotron Resonance, UDECR);
- геликонные источники, в которых ВЧ-плазма возбуждается с помощью специальных внешних антенн, генерирующих объемные волны геликонного типа, обеспечивающие эффективную передачу в плазму полезной мощности без ограничений из-за глубины сканирования;
- системы на основе ВЧ индукционного (трансформаторного) разряда, к которым относятся источники с индуктивно-связанной плазмой (ИСП) цилиндрического типа (с цилиндрической антенной), источники с ИСП плоского типа (с плоской спиральной антенной), часто называемые системами с трансформаторно-связанной плазмой (ТСП) (Transformer Coupled Plasma, TCP) и источники на основе ВЧ индукционного разряда с нейтральным контуром (Neutral Loop Discharge, NLD).

В настоящее время системы с ПВП, работающие при низких давлениях, кроме реализации процессов ионного травления и распыления, широко используются для [5-7]:

- реактивного ионно-плазменного травления (РИПТ) (Reactive Ion Etching, RIE), реактивного ионно-лучевого травления (РИЛТ) (Reactive

Ion Beam Etching, RIBE), плазмохимического травления (ПХТ) (Plasma Etching, PE), ионно-стимулированного газового травления (ИСГТ) (Ion Enhanced Gas Etching, IEGE);

- ионно-стимулированного осаждения термически испаренных или физически распыленных материалов (Ion Enhanced Physical Vapor Deposition, IE PVD);
- плазмостимулированного химического осаждения из газовой фазы (ПС ХОГФ) (plasma enhanced chemical vapor deposition, PE CVD), плазмостимулированного осаждения атомных слоев из газовой фазы (Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition, PE ALD);
- плазменной низкоэнергетической ионной имплантации (Plasma Immersed Ion Implantation, PIII) и ионной модификации (ion modification) поверхностных слоев материалов;
- плазмостимулированной (ионно-стимулированной) диффузии (Plasma (ion) Enhanced Diffusion, PED);
- плазмостимулированного газового окисления или азотирования (Plasma Enhanced Gas Oxidation or Nitration).

Во всех рассмотренных процессах основной параметр систем ПВП, определяющий скорость процессов и производительность оборудования, – плотность ионного тока насыщения на подложкодержатель j_{is} , рассчитываемая по формуле [25]:

$$j_{is} = [0,52 \cdot e \cdot n_i \cdot (k \cdot T_e)^{1/2}] / (M_i)^{1/2}, \text{ мА/см}^2, \quad (22)$$

где e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; M_i – масса иона аргона, T_e – температура электронов; n_i – концентрация ионов.

Поэтому оценивать системы ПВП низкого давления (табл.3), используемые для реализации рассматриваемых технологических процессов, следует на основе их энергетической эффективности по ионному току α_{si} , определяемой как отношение ионного тока насыщения на подложкодержатель (пластину) I_{is} к мощности, приложенной к плазменной системе, W_s :

$$\alpha_{si} = I_{is} / W_s = j_{is} \cdot S_w / W_s = j_{is} \cdot \pi \cdot D_w^2 / 4 W_s, \text{ мА/Вт}, \quad (23)$$

где $j_{is} \cdot S_w = I_{is}$, $S_w = \pi \cdot D_w^2 / 4$ – площадь пластины, D_w – диаметр пластины.

Из табл.3 видно, что по энергетической эффективности по ионному току α_{si} все известные зарубежные и отечественные системы генерации ПВП значительно (в 3-3,5 раза) уступают,

Таблица 3. Параметры лучших отечественных и зарубежных систем ПВП в области низких давлений

Система плазмы высокой плотности	Параметр					
	Мощность, приложенная к плазменной системе W_s , Вт	Рабочее давление аргона в плазменной системе p , Па (концентрация молекул аргона n , $см^{-3}$)	Индукция магнитного поля в области генерации плазмы B , Гс	Концентрация электронов n_e и ионов n_i в плазме, $см^{-3}$ (температура электронов T_e , эВ)	Плотность ионного тока насыщения на подложкодержатель j_i , $мА/см^2$ (D^w , мм)	Энергетическая эффективность плазменной системы по ионному току α_{si} , $мА/Вт$
Плоская ВЧ ТСП система компании "ЭСТО – Вакуум" [16,17]	1000	0,1 ($2,4 \cdot 10^{13}$)	10	$5 \cdot 10^{11}$ (5)	25 (150)	4,37
Цилиндрическая ВЧ ИСП система с нейтральным контуром (Япония) [18]	1000	0,2 ($4,8 \cdot 10^{13}$)	20	$3 \cdot 10^{11}$ (5)	6,0 (150)	1,05
Плоская ВЧ ТСП система с нейтральным контуром (Германия) [19]	1000	0,2 ($4,8 \cdot 10^{13}$)	20	$3 \cdot 10^{11}$ (5)	6,0 (150)	1,05
Плоская ВЧ ТСП система без магнитного поля (Франция) [20]	2000	0,4 ($9,6 \cdot 10^{13}$)	0	$1,5 \cdot 10^{11}$ (5)	2,5 (200)	0,39
ВЧ-система на базе цилиндрического геликонного источника (США) [21]	3000	0,4 ($9,6 \cdot 10^{13}$)	200	$6 \cdot 10^{11}$ (8)	8,0 (200)	1,24
ВЧ-система на базе плоского геликонного источника (Украина) [22]	1000	0,4 ($9,6 \cdot 10^{13}$)	50	$3 \cdot 10^{11}$ (7)	6,0 (150)	1,05
Цилиндрическая ВЧ ИСП система (Великобритания) [23]	1500	0,4 ($9,6 \cdot 10^{13}$)	50	$3 \cdot 10^{11}$ (8)	4,0 (200)	1,24
СВЧ ЭЦР система [5, 24]	1500	0,2 ($4,8 \cdot 10^{13}$)	875	$7 \cdot 10^{11}$ (8)	12 (150)	1,41

разработанной и запатентованной системе с трансформаторно-связанной плазмой (ТСП) компании "ЭСТО – Вакуум".

Таким образом, специальное технологическое оборудование на основе универсального, легко масштабируемого и энергосберегающего

источника плазмы высокой плотности компании "ЭСТО – Вакуум" при равных экономических показателях, определяемых государством, будет конкурентоспособно и иметь большой спрос на мировом рынке. Установка может быть использована для выполнения таких уникальных технологических процессов как очистка, травление, проявление, нанесение пленок, модификации и имплантации материалов и функциональных слоев ИМС.

Источник плазмы (ионов) высокой плотности компании "ЭСТО – Вакуум" может быть выполнен в нескольких конструктивных вариантах, обеспечивающих травление материала на подложке, нанесение материала на подложку и модификацию поверхностных слоев материала на подложке [16, 17, 26]. На основе таких конструктивных вариантов возможна эффективная разработка модулей кластерного оборудования разного функционального назначения. Кластерное оборудование может содержать одну или несколько универсальных камер загрузки-выгрузки пластин и процессные модули, пристыкованные к универсальному транспортному модулю, с объединенной вакуумной системой и системой управления. Именно набор процессных модулей и их совершенство определяют технологические возможности, качество, назначение и рынки сбыта кластерного оборудования. Часто, но не всегда, число процессных модулей соответствует числу операций, необходимых для формирования законченной системы, узла микросхемы или наноприбора, например системы металлизации ИМС или узла датчиков нанoeлектромеханической системы.

Энергетическая эффективность генерации ионов кластерной установки с несколькими процессными модулями на основе различных конструктивных вариантов уникального источника плазмы компании "ЭСТО – Вакуум" в сравнении с обычным оборудованием с одним процессным модулем будет намного выше, чем у всех известных мировых аналогов. Это позволит интегрировано реализовывать такие уникальные, высоко разрешающие и энергосберегающие технологические процессы, как:

- нанесение слоев и покрытий различных материалов с управляемыми теплофизическими и физико-химическими свойствами;
- очистка, модификация и имплантация поверхности различных материалов с целью придания им требуемых физико-химических свойств;
- высоко разрешающее (с субнанометровым разрешением) травление и проявление

различных материалов в маршрутах современной фотолитографии и нанопринт литографии;

- глубокое реактивное ионное травление в маршрутах микронаноприборов с трехмерной интеграцией;
- перечисленные выше технологические процессы обработки кремниевых пластин диаметром 450 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Киреев В.Ю.** Введение в технологии микроэлектроники и нанотехнологии. – М.: ФГУП "ЦНИИХМ", 2008.
2. Модель Aspen II Strip. Рекламные материалы фирмы Mattson Technology Inc., США. – www.mattson.com/technology.asp.
3. Модель BobCat 208. Рекламные материалы фирмы Matrix Integrated Systems Inc., США. – www.gomatrix.com.
4. **Гомжин И., Гликсон Б., Гушин О. и др.** Автоматическая установка удаления фоторезиста "Плазма 150А". – Электроника: НТБ, 2003, № 6.
5. High density plasma sources: Design, Physics and Performance. /edited by Popov O.A. – Noyes Publication, New Jersey, USA, 1995.
6. **Киреев В., Столяров А.** Технологии микроэлектроники. Химическое осаждение из газовой фазы. – М. Техносфера, 2006.
7. **Данилин Б.С., Киреев В.Ю.** Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
8. **Киреев В.Ю.** Вакуумная газо-плазменная обработка – Инженерный журнал. Справочник, 1999, №2 (23).
9. **Ворончев Т.А., Соболев В.Д.** Физические основы электровакуумной техники. – М.: Высшая школа, 1967.
10. **Киреев В.Ю., Пашков В.Ю., Сологуб В.А. и др.** Проблемы выбора конструкционных материалов реакторов плазмохимического травления. – Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника, 1991, вып. 6 (145).
11. **Данилин Б.С., Киреев В.Ю., Сырчин В.К.** Энергетическая эффективность процесса ионного распыления материалов и систем для его реализации. – Физика и химия обработки материалов, 1979, №2, с.52–56.
12. **Плешивцев Н.В.** Катодное распыление. – М.: Атомиздат, 1968.
13. **Sigmund P.** Theory of Sputtering. – Phys. Rev., 1969, v.184, №2.
14. Технология тонких пленок. Справочник/Под

- ред. Майссела Л. и Глэнга Р., т.1. – М.: Советское радио, 1977.
15. **Плешивцев Н.В., Бажин А.И.** Физика воздействия ионных пучков на материалы. – М.: Вузовская книга, 1998.
 16. **Берлин Е.В.** Высокочастотный газоразрядный источник ионов высокой плотности с низкоимпедансной антенной. – Патент РФ №2171555 от 06.03.2000 г.
 17. **Берлин Е., Двинин С., Морозовский Н. и др.** Реактивное ионно-плазменное травление и осаждение. Установка "Каролина 15". – Электроника: НТБ, 2003, №2.
 18. **Uchida T., Hamaguchi S.** Magnetic neutral loop discharge (NDL) plasmas for surface processing. – J. Phys. D: Appl. Phys., 2008, v. 41.
 19. **Gans T., Crintea D.L., O'Connell D.** A planar inductively coupled radio-frequency magnetic neutral loop discharge. – J. Phys. D: Appl. Phys., 2007, v. 40.
 20. Рекламный материал фирмы Alcatel Micro Machining Systems – AMMS (Франция) на установку травления с плоской ВЧ-системой и трансформаторно-связанной плазмой.
 21. **Aanesland A., Charles C., Boswell R.W. et al.** Helicon plasma with additional immersed antenna. – J. Phys. D: Appl. Phys., 2004, v. 37.
 22. **Слободян В.М., Вирко В.Ф., Кириченко Г.С. и др.** Геликонный разряд, возбуждаемый плоской антенной вдоль магнитного поля. – Труды международного семинара "Импульсные мощные ускорители и технологии", 2003, Харьков, Украина.
 23. Рекламный материал фирмы Oxford Instruments Plasma Technology" (Великобритания) на установку травления с цилиндрической ВЧ-системой и индуктивно-связанной плазмой.
 24. **Шаповал С.Ю.** Применение ЭЦР-плазмы в технологии наноструктур. – Материалы Всероссийской научной конференции по физике низкотемпературной плазмы. ФНТП-2004, Петрозаводск 28-30 июня 2004, т.2.
 25. **Райзер Ю.П.** Физика газового разряда: Учебное руководство. – М.: Наука, 1987.
 26. **Берлин Е.В.** Способ нанесения металлического покрытия на диэлектрическую подложку и устройство для его осуществления. – Патент РФ №2285742 от 27.07.2004 г.