

ПОЛУЧЕНИЕ ЧЕРЕДУЮЩИХСЯ СЛОЕВ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ В ЕДИНОМ ПРОЦЕССЕ

Одна из важнейших задач при производстве современных полупроводниковых высокочастотных приборов, в частности арсенидгаллиевых полевых транзисторов, – формирование элементов субмикронных размеров. А для ее решения необходимо отработать процесс нанесения в одном вакуумном цикле чередующихся слоев различных диэлектриков, как правило соединений кремния – его нитрида и оксида. Это приведет не только к увеличению производительности, но и к снижению плотности дефектов в осаждаемых пленках. Но зачастую, в частности при нанесении покрытий на пластины арсенида галлия, допустимая температура процесса не должна превышать 300°C. Установка и режимы нанесения высококачественных диэлектрических пленок в одном процессе предложены специалистами НПП "Тирс" (г. Зеленоград).

Обеспечить достаточно высокие адгезию осаждаемой пленки и скорость ее нанесения (1–2 мкм/ч) при достаточно низкой температуре (менее 300°C) позволяет метод реактивного магнетронного нанесения, при котором кремниевая мишень расплывается в смеси аргона и реактивного газа – азота или кислорода [1,2]. Для проведения процесса магнетронного нанесения чередующихся диэлектрических пленок в одном вакуумном цикле была разработана модернизированная установка УВН-71ПЗ. В ее камере вертикально установлен протяженный магнетрон с монокристаллической кремниевой (КЭФ 0,1) мишенью размером 350x100x6 мм³, прижимаемой к водоохлаждаемому основанию. Для питания магнетрона использован блок постоянного тока типа ИВЕ-124 фирмы Consent, который содержит бестрансформаторный преобразователь тока промышленной частоты в ток с частотой 30 кГц. Максимальная мощность блока – 4 кВт, максимальный ток – 8 А.

Подложки кремния или арсенида галлия диаметром 50–100 мм попарно помещаются в кассеты, устанавливаемые на внутренней поверхности барабана диаметром 500 мм и высотой 450 мм. Общая загрузка – 24 пластины. Скорость вращения барабана при нанесении слоев равна 25 об/мин. Кроме магнетрона внутрь барабана вмонтирован протяженный ионный источник типа "Радикал". Его назначение – предварительная очистка подложек пучком ионов кислорода при токе 300 мА в течение 3 мин. Перед нанесением слоев подложки нагреваются излучением четырех ламп КГ-220-1000 до температуры 250°C.

Газы (аргон, азот и кислород) подаются в камеру через газораспределительную систему ионного источника. Их поток задается ре-

Е.Берлин, А.Воробьев,
Л.Сейдман

гуляторами расхода газов с помощью блока управления подачей газов типа РРГ-9-2,5. Вакуумная камера откачивается диффузионным насосом Н-2Т с азотной ловушкой на входе и механическим насосом НВПР-16-066. На входе диффузионного насоса для согласования скорости его откачки с производительностью механического насоса установлена диафрагма, что снижает эффективную скорость откачки камеры до 0,3 м³/с.

Для определения зависимостей параметров процесса снимались вольт-амперные характеристики (ВАХ) разрядов в различных газовых средах (рис. 1). Первая ВАХ была получена для разряда в среде аргона при его потоке в камеру 0,026 Вт. Она представляет собой типичную для неактивного разряда монотонную кривую, описываемую уравнением

$$I = a \cdot U^b,$$

где I – ток разряда в амперах, U – напряжение разряда в вольтах, $a = 2 \cdot 10^{-15}$ – коэффициент пропорциональности и $b = 6$ – показатель степени.

Показатель степени характеризует силу магнитного поля магнетрона, удерживающего электроны у поверхности подложки. Его сравнительно небольшое значение в данном случае говорит о том, что магнитное поле ослаблено из-за большой суммарной толщины мишени и ее основания. Толщину мишени можно уменьшить, но при этом сократится срок ее службы и коэффициент использования.

Вторая ВАХ соответствует разряду в среде, в которой к аргону добавлен поток кислорода 0,032 Вт. Она имеет типичный для реактивных процессов N-образный вид [1-3]. Как известно, для получения устойчивых режимов таких разрядов необходимо применять источник питания магнетрона со стабилизированным напряжением [4], что и было сделано во всех последующих экспериментах. И, наконец, третья ВАХ получена при том же потоке аргона и потоке азота 0,023 Вт. Ее монотонный, а не обычный N-образный, характер свидетельствует о том, что скорость поглощения азота пленкой много меньше скорости поглощения кислорода и сравнима со скоростью откачки камеры.

На рис.1 хорошо видно, что напряжение реактивных разрядов значительно меньше, чем у неактивного разряда. Для получения интересных нас соединений рабочий диапазон напряжений составляет 400–550 В, что необходимо учитывать при выборе источника питания. В обоих случаях чем выше напряжение разряда, тем больше скорость осаждения, но и больше концентрация атомов кремния в слоях. Для нахождения оптимальных параметров процесса использовалась компьютерная модель реактивного процесса, построенная на основе модели Берга [5]. Такая модель позволяет вычислять все параметры, в частности степень покрытия поверхно-

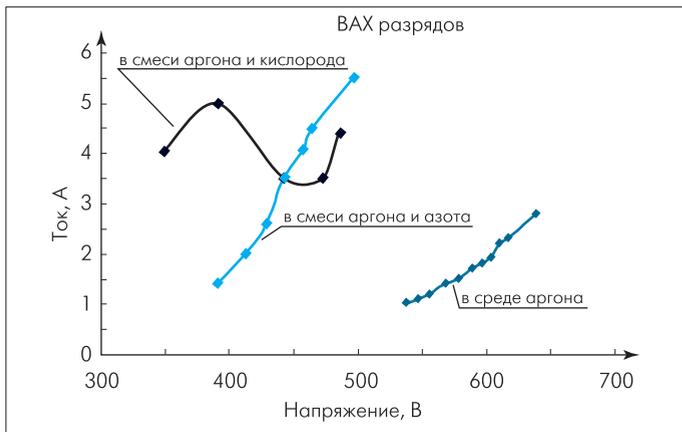


Рис.1. Экспериментальные вольт-амперные характеристики разрядов магнетрона с кремниевой мишенью

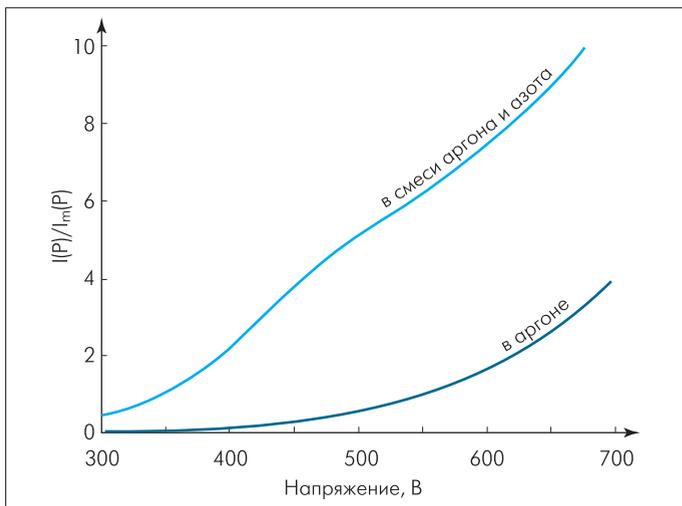


Рис.2. Расчетные вольт-амперные характеристики магнетронного разряда

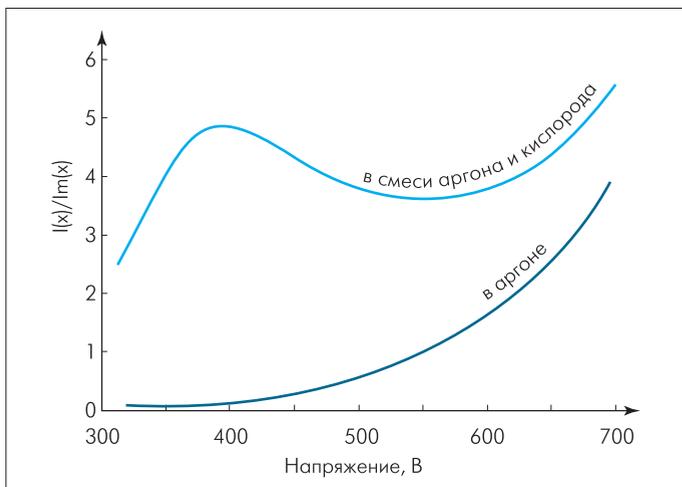


Рис.3. Расчетные вольт-амперные характеристики магнетронного разряда

сти мишени диэлектриком – θ , что в свою очередь позволяет вывести зависимости ВАХ реактивного разряда вида

$$I = a \cdot U^{b+c\theta},$$

где c – коэффициент пропорциональности, зависящий от коэффициента вторичной электронной эмиссии диэлектрика (для нитрида

$c = 0,55$, для оксида – 0,9). Результаты расчета ВАХ приведены на рис.2 и 3. Их достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными (см. рис.1) говорит о правильности используемой модели. Это позволило сократить число дальнейших экспериментов по определению взаимозависимостей параметров процесса при фиксированном напряжении разряда.

Зависимости скорости поглощения реактивного газа (f_U) растущими пленками оксида кремния и нитрида кремния сильно отличаются друг от друга (рис.4 и 5). При осаждении нитрида кремния с увеличением тока f_U сначала растет, проходит через максимум и затем снижается. Но даже в максимуме f_U не превышает $0,8 \text{ м}^3/\text{с}$. При осаждении оксида кремния в тех же условиях f_U уменьшается со значения более $50 \text{ м}^3/\text{с}$ при малых потоках кислорода до $5 \text{ м}^3/\text{с}$ при получении стехиометрического соединения. Это подтверждает данное выше объяснение различия ВАХ обоих разрядов.

Остальные свойства разряда в обоих реактивных газах идентичны. Зависимости тока разряда от потока реактивного газа в вакуумную камеру для кислорода и азота практически линейные (рис.6 и 7), т. е. ток разряда может служить мерой потока реактивного газа. Зависимости скорости роста от тока разряда в обоих случаях монотонные и почти линейные (рис.8 и 9). Никаких спонтанных переходов между различными состояниями разряда не наблюдается, и все режимы стабильны. Состав пленок, выраженный как отношение числа атомов кремния в пленке к числу атомов газа, зависит от тока разряда (рис.10 и 11). Зависимости, как и в предыдущих случаях, монотонные. Чем больше поток реактивного газа, тем больше ток разряда и тем ближе состав пленки к стехиометрическому. Из этих графиков можно определить режимы, необходимые для получения прозрачных и бесцветных пленок нитрида кремния и его оксида с близким к стехиометрическому составом (см.табл.).

Найденные экспериментально режимы были использованы для нанесения пленок на пластины арсенида галлия с приборными

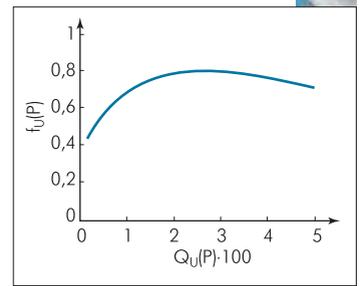


Рис.4. Скорость поглощения азота растущей пленкой нитрида кремния

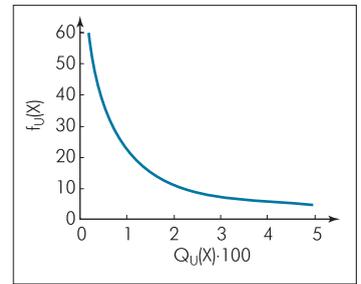


Рис.5. Скорость поглощения кислорода растущей пленкой оксида кремния

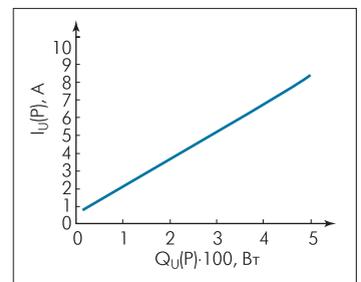


Рис.6. Зависимость тока разряда от потока азота в камеру при постоянном напряжении разряда

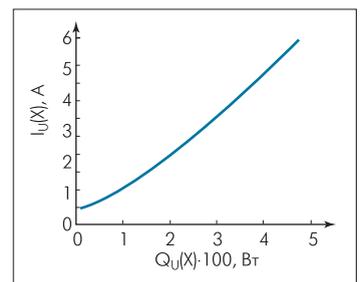


Рис.7. Зависимость тока разряда от потока кислорода в камеру при постоянном напряжении разряда

Расчетные и полученные экспериментальным путем режимы нанесения стехиометрических пленок нитрида кремния и оксида кремния

Соединение	Напряжение разряда, В		Ток разряда в смеси газов, А		Поток реактивного газа, Вт		Скорость нанесения, мкм/ч	
	Расчетное	Эксперим.	Расчетное	Эксперим.	Расчетное	Эксперим.	Расчетное	Эксперим.
Нитрид кремния	510	500	6	6	0,03	0,025	1,2	1,26
Оксид кремния	500	520	5,5	5	0,04	0,037	1,44	1,35

структурами. Одна из важнейших технологических задач, которую необходимо было решить при создании арсенидгаллиевого полевого ВЧ-транзистора, – формирование электрода затвора субмикронного размера, расположенного точно в середине канавки шириной 1,5–2 мкм. Размер затвора и точность его совмещения с канавкой существенно влияют на коэффициент усиления по мощности и пробивное напряжение затвора. Наилучшие результаты были получены при использовании технологии самосовмещения электрода затвора с канавкой, предусматривающей нанесение двухслойного диэлектрического покрытия SiO₂ и Si₃N₄ и его селективное травление. По этой технологии в верхнем слое нитрида кремния методами электронной литографии и ионного травления формировали окна, соответствующие по размерам электроду затвора – 1,5–2 мкм. Затем такие же окна формировали химическим травлением в слое оксида кремния. Благодаря изотропности химического травления эти окна были точно совмещены с окнами в слое нитрида кремния. В полученной таким образом структуре сначала вытравливали канавку, а затем напылением формировали электрод затвора. Диэлектрические слои в такой самосовмещенной структуре должны отвечать следующим требованиям: хорошая адгезия к подложке и между слоя-

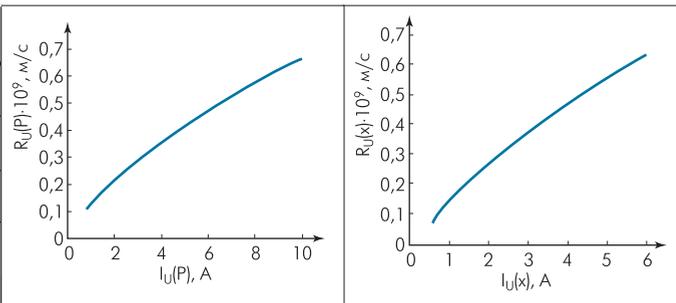


Рис.8. Зависимость скорости роста пленки нитрида от тока разряда

Рис.9. Зависимость скорости роста пленки оксида кремния от тока разряда

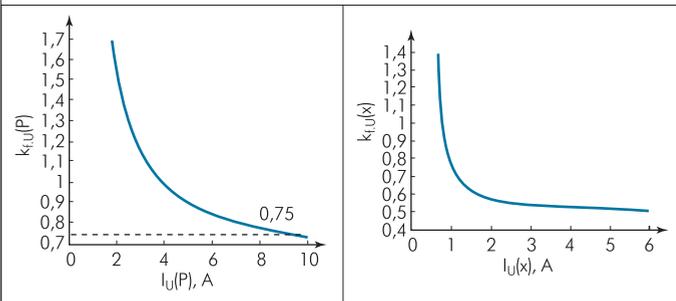


Рис.10. Зависимость состава пленки нитрида кремния от тока разряда. Пунктиром отмечен стехиометрический состав пленки

Рис.11. Зависимость состава пленки оксида кремния от тока разряда

ми, низкая плотность объемного заряда, низкий уровень механических напряжений и отсутствие посторонних примесей. Всем этим требованиям отвечали нанесенные в соответствии с определенными выше режимами слои нитрида кремния и его оксида.

Таким образом, собранная и сданная в эксплуатацию вакуумная напылительная установка для нанесения многослойных диэлектриков на основе кремния пригодна для осаждения пленок кремния, его оксида и нитрида в любой комбинации. Скорость нанесения диэлектриков составляет не менее 1,2 мкм/ч на вращающуюся подложку и 12 мкм/ч на неподвижную. Температура подложек во время нанесения пленок не превышала 300°С.

Полученные пленки диэлектриков были использованы при формировании самосовмещенного с канавкой шириной 1,5–2 мкм субмикронного электрода затвора арсенидгаллиевого полевого ВЧ-транзистора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сейдман Л.А., Фомичев В.Н. Новое применение установки "Оратория-5": нанесение диэлектриков на крупноформатные подложки. – Электронная промышленность, 1990, вып. 3, с. 60–61.
2. Сейдман Л.А., Спектор А.А. Низкотемпературное нанесение пленок двуоксида кремния. - Электронная промышленность, 1988, вып. 7, с. 13–14.
3. Ohsaki E. et al. High-rate deposition of SiO₂ by modulated DC reactive sputtering in the transition mode without a feedback system. – Thin Solid Film, 1996, № 281–282, p. 213–217.
4. Сейдман Л.А. Способы управления процессом реактивного магнетронного распыления с помощью вольтамперных характеристик разряда. – Труды постоянно действующего семинара "Электровакuumная техника и технология" / Под ред. А.В.Горина, Москва, 1999, 168 с.
5. Berg S. et al. Computer modeling as a tool to predict deposition rate and film composition in reactive sputtering process. – J. Vac. Sci. Technol. A, 1998, vol. 16, № 3, p. 1277-1285.