

С учетом изложенного, для прогнозирования температуры нагрева кремниевой пластины (без покрытий) при БТО на установке «УБТО 1801» выражение (2) принимает следующий вид:

$$T = T_0 + \sum_{i=1}^n \frac{[5,17 \cdot 10^{-3} (1-R) P_{эл} - \sigma (T_i^4 - T_{окр}^4)] \Delta t}{\rho(T_i) c(T_i) h}. \quad (8)$$

Заключение. На базе уравнения теплопроводности разработана математическая модель нагрева высоколегированных кремниевых пластин при БТО на установке «УБТО 1801», предсказывающая температуру пластины при ее увеличении на 550–930 К с погрешностью менее 2,3 %.

Литература

1. Doering R. Handbook of semiconductor manufacturing technology / R. Doering, Y. Nishi. New York; CRC Press, 2008. – 1722 p.

2. Пилипенко В.А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В.А. Пилипенко. – Мн.: Изд. Центр БГУ, 2004. – 531 с.

3. Солодуха В.А. Роботизированная установка быстрой термической обработки для создания изделий электронной техники / В.А. Солодуха, В.А. Пилипенко, В.П. Яковлев // Доклады БГУИР. – 2019. – № 4 (122). – С. 92–97.

4. Кулаков М.В. Измерение температуры поверхности твердых тел / М.В. Кулаков, Б.И. Макаров. – М.: «Энергия», 1969. – 136 с.

5. Сорокин Д.Н. Динамические характеристики термопар / Д.Н. Сорокин, Ю.П. Джусов. – Обнинск.: ФЭИ, 1973. – 29 с.

6. Шелудяк Ю.Е. Теплофизические свойства компонентов горючих систем / Ю.Е. Шелудяк, Л.Я. Кашпоров, Л.А. Малинин, В.Н. Цалков. М.: НПО Информ ТЭИ, 1992. – 184 с.

7. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. М.: «Энергия», 1977. – 344 с.

УДК 621.382.002

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК SiOF ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Телеш Е.В., Данилевич Д.С.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Актуальной проблемой микро- и наноэлектроники является поиск новых материалов с низкой диэлектрической проницаемостью (low-k-диэлектрики) и разработка современных технологий формирования тонкопленочных слоев из этих материалов. В качестве изолирующих диэлектрических слоев с низкой диэлектрической проницаемостью могут использоваться различные классы органических и неорганических соединений, а также гибридные неорганические - органические соединения. Традиционные диэлектрики, например SiO₂, имеют ε = 3,9 и выше, что не удовлетворяет современным требованиям. Для снижения диэлектрической проницаемости плёнок диоксида кремния применяют насыщение их фтором [1].

В последние годы все больше внимания исследователей привлекают методы, основанные на нанесении тонкопленочных покрытий из ионных потоков или пучков [2]. Нами предложен новый метод синтеза легированных пленок диоксида кремния, использующий для формирования ионных пучков вторичный плазменный разряд в ионном источнике на основе ускорителя с анодным слоем [3]. Внешний вид пучка приведен на рисунке 1.



Рисунок 1 – Внешний вид ионного пучка

Проведено исследование влияния состава рабочего газа и температуры подложки на структурно-фазовые, электрофизические и оптические характеристики покрытий из SiOF. Экспериментальные исследования проводили на установке ВУ-1А, оснащенной ионным источником на основе ускорителя с анодным слоем. В качестве рабочих газов использовались, смесь моносилана с аргоном (5 % SiH₄+95 % Ar), хладон-14 и кислород. Покрытия наносились на неподвижные подложки из кремния и стекла К8. Остаточное давление составляло ~4,0·10⁻³ Па, ускоряющее напряжение –2,0 кВ, ток разряда –60 мА, потенциал диафрагмы – 0. Скорость нанесения изменялась в диапазоне 1,1–1,2 нм/с. Температура подложки не превышала 313 К. Результаты исследования состава рабочего газа на электрофизические параметры слоев приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения электрофизических параметров слоев

P _{O2} , Па	P _{CF4} , Па	P _{SiH4} , Па	ε	tgδ	ρ _v , Ом·м
2,4·10 ⁻²	3,0·10 ⁻²	5,7·10 ⁻²	5,70	0,18	1,8·10 ⁴
2,5·10 ⁻²	3,6·10 ⁻²	5,8·10 ⁻²	3,11	0,39	1,4·10 ⁴
2,4·10 ⁻²	4,0·10 ⁻²	5,8·10 ⁻²	2,89	0,06	1,05·10 ⁵

Анализ данных таблицы показывает, что увеличение парциального давления хладона-14 способствовало существенному улучшению электрофизических параметров слоев. Диэлектрическая проницаемость существенно снижалась до ε = 2,89 при давлении хладона 4,0·10⁻² Па, диэлектрические потери – до tgδ = 0,06, а

удельное объемное сопротивление возросло более, чем в 5 раз.

Спектры оптического пропускания и поглощения в диапазоне $\lambda = 350\text{--}900$ нм определялись при помощи спектрофотометра МС-121. На рисунке 2 приведены спектры оптического пропускания и поглощения покрытий SiOF, нанесенных при различных парциальных давлениях хладона.

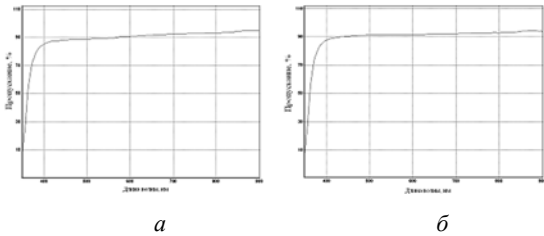


Рисунок 2 – Спектры оптического пропускания и поглощения покрытий SiOF, нанесенных при давлении хладона $3,0 \cdot 10^{-2}$ Па (а) и $4,0 \cdot 10^{-2}$ Па (б)

Покрyтия имели прозрачность около 90 % в широком диапазоне частот, что свидетельствует об их высоком качестве. Установлено, что повышение давления хладона способствует небольшому повышению пропускания.

Нагрев подложки приводил к улучшению оптических характеристик пленок SiOF. Так при температуре подложки 453 К увеличилось пропускание в видимой и ИК областях спектра (рисунк 3).

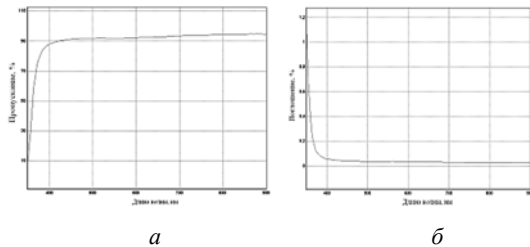


Рисунок 3 – Спектры оптического пропускания (а) и поглощения (б) покрытий SiOF, нанесенных при давлении хладона $3,6 \cdot 10^{-2}$ Па и температуре подложки 453 К

На рисунке 4 приведены зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса диэлектрических потерь от температуры подложки $T_{\text{п}}$. Парциальное давление хладона-14 составляло $3,6 \cdot 10^{-2}$ Па. Установлено, что эти зависимости имеют экстремумный характер. Лучшие параметры слоя SiOF имели при $T_{\text{п}} \sim 450\text{--}470$ К. Зависимость удельного объемного сопротивления от $T_{\text{п}}$ также носила похожий характер. Максимальное значение $\rho_v = 1,63 \cdot 10^5$ Ом·м было достигнуто при нагреве подложки до 453 К.

С целью идентификации состава полученных пленок проводились измерения ИК спектров пропускания (рисунк 5). Спектры регистрировались в спектральной области 2 000–

400 см^{-1} . В этом диапазоне все полученные пленки имели три характерные полосы поглощения: полосу около $\nu_s=800$ см^{-1} , соответствующую валентным симметричным колебаниям Si→O←Si; полосу около $\nu_{as}=1085$ см^{-1} , соответствующую валентным антисимметричным колебаниям Si←→O← Si; полосу около $\delta_{as}=450$ см^{-1} , соответствующую деформационным дважды вырожденным колебаниям Si–O–Si. Также на спектре имеется четко выраженная полоса поглощения кремниевой подложки с частотой ~ 607 см^{-1} . Установлено наличие полосы поглощения фторида кремния Si–F на частоте ~ 935 см^{-1} . Наблюдались также полосы поглощения на связях C–H и C–O.

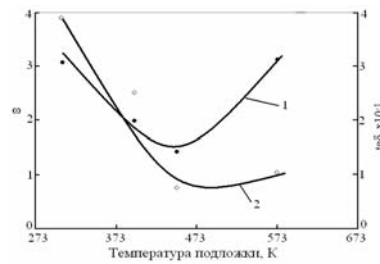


Рисунок 4– Зависимость диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пленок SiOF от температуры подложки: 1 – ϵ ; 2 – $\text{tg}\delta$

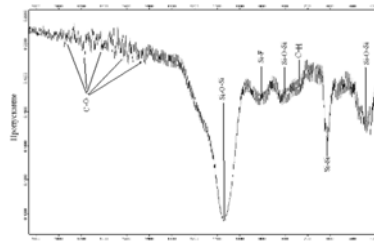


Рисунок 5 – ИК спектр пропускания покрытия SiOF, нанесенного при парциальном давлении хладона $3,0 \cdot 10^{-2}$ Па и температуре подложки 313 К

На рисунке 6 представлен ИК спектр пропускания покрытия SiOF, полученного при температуре подложки 453 К и парциальном давлении хладона $3,6 \cdot 10^{-2}$ Па.

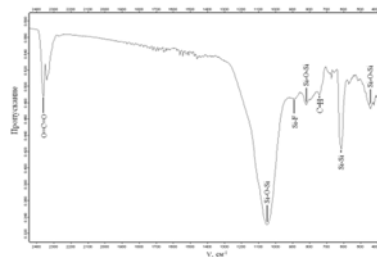


Рисунок 6 – ИК спектр пропускания покрытия SiOF, нанесенного при температуре подложки 453 К и парциальном давлении хладона $3,6 \cdot 10^{-2}$ Па

Установлено снижение интенсивности полосы поглощения фторида кремния Si–F на частоте ~ 935 см^{-1} , что можно объяснить десорбцией фто-

ра. Нагрев подложки приводил к снижению поглощения на связях C–O и , наоборот, росту поглощения на связи O=C=O.

Литература

1. Murarka S.P. Low dielectric constant materials for interlayer dielectric application / S.P. Murarka //Solid State Technology. 1996. – № 3. – P. 83–89.

2. Телеш Е.В. Формирование оптических покрытий прямым осаждением из ионных пучков / Е.В. Телеш, Н.К. Касинский // Контенант, 2014. – Т. 13. – № 2. – С. 27–30.

3. Телеш Е.В. Применение вторичного разряда в ускорителе с анодным слоем для формирования оптических покрытий из диоксида кремния / Е.В. Телеш, А.П. Достанко // Контенант. – 2014. – Т. 13. – № 2. – С. 31–33.

УДК 621.382.002

СИНТЕЗ ПЛЕНОК НИТРИДА УГЛЕРОДА ПРЯМЫМ ОСАЖДЕНИЕМ ИЗ ИОННЫХ ПУЧКОВ

Телеш Е.В., Романович Я.Г.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Минск, Республика Беларусь

Ранее было установлено, что β - C_3N_4 , аналогичный β - Si_3N_4 , может обладать твердостью, сравнимой с твердостью алмаза. Дальнейшие расчеты показали, что другие кристаллические фазы C_3N_4 должны иметь стабильность, сравнимую или большую, чем стабильность β - C_3N_4 , и что многие из этих структур должны быть твердыми по природе. C_3N_4 -структуры включают α -, β -, кубический, псевдокубический и графитообразный нитрид углерода. Пленки из нитрида углерода обладают высокой износостойкостью и устойчивостью к царапанию, являются коррозионностойкими и более устойчивыми к воздействию высоких температур по сравнению с алмазоподобными покрытиями [1].

Тонкие пленки нитрида углерода имеют широкий спектр применений. Например, их используют в качестве защитных покрытий для жестких дисков. Покрытия из нитрида углерода могут использоваться для таких областей применения, как износостойкие и противокоррозионные покрытия, в качестве диэлектрических слоев в микроэлектронных устройствах, как оптические покрытия [2, 3]. Такие пленки получают в основном реактивным испарением или распылением графита в среде азота. Нами предложен новый метод синтеза пленок нитрида углерода – прямое осаждение из ионных пучков, формируемых ускорителем с анодным слоем в режиме ионно-пучкового фокуса [4].

Проведено исследование влияния состава рабочего газа, напряжения на диафрагме и температуры подложки на электрофизические и механические характеристики покрытий из нитрида углерода, полученных осаждением из вторичного ионного пучка, формируемого ускорителем с анодным слоем в режиме ионно-пучкового фокуса. Экспериментальные исследования проводили на установке ВУ-1А, оснащенной ионным источником на основе ускорителя с анодным слоем (рисунок 1). В качестве рабочих газов использовались метан и азот. Покрытия наносились на

неподвижные подложки из кремния и стекла. Остаточное давление составляло $\sim 3,5 \cdot 10^{-3}$ Па, ускоряющее напряжение – (2,3–2,4) кВ, ток разряда – 75–80 мА. Толщина покрытий определялась с помощью микроскопа-интерферометра МИИ-4. Скорость нанесения изменялась в диапазоне 0,1–0,16 нм/с и зависела от парциального давления азота и напряжения на диафрагме. Электрофизические параметры пленок (удельное объемное сопротивление ρ_v , тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$) покрытий осуществляли путем измерения характеристик структур металл–пленка нитрида углерода–кремний. Металлические контакты диаметром 0,35 мм формировались путем напыления через маску пленки никеля толщиной $\sim 0,2$ мкм. Сопротивление и $\tan \delta$ тестовых структур измерялись с помощью измерителя иммитанса Е7-20 на частоте 1 МГц. Результаты исследования влияния режимов синтеза на электрофизические параметры слоев приведены в таблице.



Рисунок 1 – Внешний вид внутрикопачного объема установки ВУ-1А

Измерение электрофизических характеристик показало, что покрытия обладали удельным объемным сопротивлением в широком диапазоне от $0,65 \cdot 10^4$ до $3,5 \cdot 10^5$ Ом·м. Тангенс угла диэлектрических потерь изменялся от 0,04 до 0,40. Увеличение парциального давления азота способствовало увеличению ρ_v и снижению диэлектрических потерь. Наилучшие параметры были