

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 621. 382

Зырянова
Александра
Сергеевна

Тонкие пленки диоксида гафния, полученные реактивным
ионно-лучевым распылением

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук

по специальности 1-39 80 03 Электронные системы и технологии

(подпись магистранта)

Научный руководитель
Достанко Анатолий Павлович

*доктор технических наук,
профессор, академик НАН РБ*

(подпись научного руководителя)

Минск 2022

ВВЕДЕНИЕ

Ускоренные темпы развития микро– и наноэлектроники требуют постоянного усовершенствования технологий и материалов, для изготовления более качественной инновационной продукции. Диоксид гафния (HfO_2) является высокотемпературным огнеупорным материалом с отличительными физическими и химическими свойствами, которые обеспечивают его применение для широкого спектра технологических приложений. В настоящее время вопросы получения и последующего исследования тонких пленок становятся HfO_2 всё более актуальными, что связано с рядом отличительных свойств данного материала, а именно высокой температурой плавления ($T=3050$ К), прочностью, хорошими оптическими и диэлектрическими характеристиками, сохраняющимися в широком интервале температур. Так, в микроэлектронике, благодаря широкой запрещённой зоне, высокой диэлектрической проницаемости и малым токам утечки HfO_2 рассматривается в качестве альтернативного диэлектрика для замены традиционно используемого диоксида кремния SiO_2 . Диоксид гафния относится к группе так называемых high-k материалов, отличительной особенностью которых является высокое значение диэлектрической постоянной. При равной удельной емкости такие диэлектрики гораздо толще и, соответственно, имеют существенно более низкие уровни туннельных токов утечки. Кроме того, диоксид гафния термодинамически стабилен в контакте с кремниевой поверхностью, что крайне важно для подзатворного диэлектрика.

Целью данной работы является реактивный ионно-лучевой синтез тонких пленок диоксида гафния и изучение их оптических и электрических характеристик.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Интерес представляют структуры на основе HfO_2 , который, по сравнению с традиционно используемым диоксидом кремния, обладает высокими значениями диэлектрической постоянной ($\epsilon_{\text{HfO}_2} = 16-25$), ширины запрещенной зоны (8,0–5,7 эВ), коэффициента преломления (1,8–2,2). Также HfO_2 является прозрачным в спектральном диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного излучения, что делает его перспективным оптическим материалом. Обладая термической и химической устойчивостью, HfO_2 термодинамически стабилен в контакте с кремниевой поверхностью, что крайне важно для подзатворного диэлектрика.

Также стоит отметить, что получения пленок ионным распылением материала мишени имеет ряд преимуществ, например, в качестве исходной мишени можно использовать тугоплавкие материалы и синтезировать соединения, которые практически невозможно получить термическим испарением. Пленки получаются более однородными по толщине и имеют высокую адгезию к подложке.

Степень разработанности проблемы

В настоящее время в микроэлектронике отмечается повышенный интерес к тонкослойным пленочным структурам на кремниевой подложке, одним из основных компонентов, для которых является гафний Hf. Структуры на основе Hf могут использоваться в качестве диффузионных барьеров для металлизации (силицид Hf) или материала оптических покрытий (диоксид гафния HfO_2). Широкий круг соединений гафния (оксинитриды, силикаты, оксиды и HfO_2) относится к так называемым high-k материалам, которые перспективны для формирования тонкого подзатворного диэлектрика.

В настоящее время существуют следующие методы нанесения тонкопленочных покрытий: химическое осаждение, электрохимическое осаждение, газотермическое напыление, вакуумное нанесение, диффузионное насыщение. Среди них методы вакуумного нанесения пользуются популярностью из-за высокой чистоты процесса. Ионно-лучевое распыление представляет собой значительно усовершенствованный вариант методов диодного и магнетронного распыления и дает возможность получить высокий коэффициент использования распыляемого материала и однородность состава пленки по толщине.

Цель и задачи исследования

Целью магистерской диссертации является исследование оптических, частотных и электрофизических характеристик тонких пленок диоксида гафния, полученных при разных режимах реактивным ионно-лучевым распылением металлической и керамической мишеней.

Объектом исследования выступают тонкие пленки диоксида гафния на кремниевой подложке, полученные при разных режимах реактивным ионно-лучевым распылением.

Предметом исследования является метод получения тонких пленок диоксида гафния – реактивное ионно-лучевое распыление.

Для достижения поставленных целей основными задачами являются:

1. Обзор характеристик и методов получения пленок диоксида гафния, а также их анализ и сравнение.
2. Получение тонких пленок диоксида гафния реактивным ионно-лучевым распылением.
3. Исследование влияния состава рабочего газа на характеристики пленок диоксида гафния.
4. Исследование влияния температуры подложки на характеристики пленок диоксида гафния.
5. Исследование влияния потенциала мишени на характеристики пленок диоксида гафния.
6. Исследование характеристики пленок диоксида гафния, полученных распылением керамической мишени.
7. Исследование влияния термического отжига на характеристики тонких пленок диоксида гафния.

Теоретическая и методологическая основа исследования

При проведении исследования и написания диссертации использованы научные публикации, техническая документация и интернет-источники, посвященные методам получения тонких пленок диоксида гафния, реактивному ионно-лучевому распылению и основным характеристикам диоксида гафния.

Для решения поставленных задач использованы следующие методы исследования: анализ, синтез, обобщение, сравнение, логической и графический методы.

Научная новизна

Научная новизна заключается в применении метода реактивного

ионно-лучевого распыления при получении тонких пленок диоксида гафния.

Теоретическая значимость работы заключается в анализе характеристик полученных пленок диоксида гафния, что может положить начало дальнейшим исследованиям использования данного метода при получении пленок HfO_2 .

Практическая значимость работы заключается в получении тонких пленок диоксида гафния при разных температурных режимах (температура подложки), разном давлении кислорода и потенциале мишени.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Экспериментально установленные условия получения тонких пленок диоксида при ускоряющем напряжении $-3,0$ кВ, токе мишени $-65-105$ мА, давлении кислорода $-с 4,0 \cdot 10^{-2}$ до $5,0 \cdot 10^{-2}$ Па, температуры подложки $-300-423$ К.

2. Параметры пленок диоксида гафния, полученные реактивным ионно-лучевым распылением металлической мишени, определяются изменениями с структуре и составе диоксида при термическом отжиге на воздухе при $T > 653$ К в течение 30 минут.

3. Установленная зависимость электрофизических характеристик пленок диоксида гафния от потенциала мишени в диапазоне $40-80$ В.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрены преимущества и перспективы применения пленок диоксида гафния, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **первой главе** дается краткий обзор литературы на тему основных оптических и электрофизических свойств диоксида гафния, а также методов получения тонкопленочных покрытий. Также рассматривается возможность применения реактивного ионно-лучевого распыления для получения тонких пленок HfO_2 и описываются основные преимущества данного метода. Также акцентируется внимание на методе улучшения качества поверхности полученных пленок с помощью проведения дополнительной высокотемпературной термообработки.

Во **второй главе** показан комплекс технологического, исследовательского и измерительного оборудования, позволяющего формировать пленки диоксида гафния при заданных режимах и проводить исследования, изучая их свойства.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния состава рабочего газа на характеристики пленок диоксида гафния, полученных методом реактивного ионно-лучевого распыления металлической мишени. Приведены спектры оптического пропускания и поглощения при различных режимах, рассмотрены значения основных оптических, электрофизических и частотных характеристик полученных пленок.

В четвертой главе представлены результаты исследования влияния температуры подложки на характеристики пленок диоксида гафния, полученных методом реактивного ионно-лучевого распыления металлической мишени. Приведены спектры оптического пропускания и поглощения при различных режимах, рассмотрены значения основных оптических, электрофизических и частотных характеристик полученных пленок.

В пятой главе представлены результаты исследования влияния потенциала мишени на характеристики пленок диоксида гафния, полученных методом реактивного ионно-лучевого распыления металлической мишени. Приведены спектры оптического пропускания и поглощения при различных режимах, рассмотрены значения основных оптических и электрофизических характеристик полученных пленок.

В шестой главе представлены результаты исследования характеристик пленок диоксида гафния, полученных методом реактивного ионно-лучевого распыления керамической мишени. Приведены спектры оптического пропускания и поглощения при различных режимах, рассмотрены значения основных оптических и электрофизических характеристик полученных пленок.

В седьмой главе представлены результаты исследования влияния термического отжига на характеристики пленок диоксида гафния, полученных методом реактивного ионно-лучевого распыления металлической мишени. Приведены спектры оптического пропускания и поглощения при различных режимах, рассмотрены значения основных оптических и электрофизических характеристик полученных пленок. Также описана морфология поверхности полученных пленок и проведен анализ шероховатости поверхности до и после высокотемпературной термической обработки.

В выводах кратко изложены основные результаты магистерской диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На диэлектрические и оптические свойства пленок HfO_2 оказывают влияние условия роста, особенности кристаллической структуры и стехиометрия выращиваемого материала, которые, в свою очередь, зависят от метода формирования пленок. Нами был использован метод реактивного ионно-лучевого распыления, достоинством которого являются относительно низкие температуры процесса нанесения пленок HfO_2 , широкий диапазон варьирования параметрами плазмы (мощностью распыления мишени, давлением, составом рабочего газа, потенциалом мишени, температурой подложки).

Проведены исследования зависимости оптических и электрофизических характеристик тонких пленок диоксида гафния от парциального давления кислорода, температуры подложки и потенциала мишени. Было установлено, что скорость нанесения пленок снижается с ростом содержания кислорода в рабочем газе. Пленки обладали пропусканием 88–94 % и поглощением 0,03–0,06 % на длине волны 555 нм. С увеличением давления пропускание уменьшается, а поглощение увеличивается. Ширина запрещенной зоны при парциальном давлении кислорода $4,4 \cdot 10^{-2}$ Па составила 5,63 эВ. Было установлено, что ширина запрещенной зоны E_g находилась в пределах 5,6...5,7 эВ и практически не зависела от парциального давления кислорода.

Ширина запрещенной зоны при парциальном давлении кислорода $4,4 \cdot 10^{-2}$ Па составила 5,63 эВ. Было установлено, что ширина запрещенной зона E_g находилась в пределах 5,6...5,7 эВ и практически не зависела от парциального давления кислорода.

Установлено, что диэлектрическая проницаемость ϵ снижается почти в 2 раза при увеличении парциального давления кислорода с $2,52 \cdot 10^{-2}$ до $5,85 \cdot 10^{-2}$ Па. При увеличении давления происходит рост удельного объемного сопротивления ρ_v , что свидетельствует о большей степени окисления гафния. Зависимость $\text{tg}\delta$ от давления кислорода показала, что содержание кислорода в рабочем газе практически не влияет на диэлектрические потери, которые изменялись в диапазоне 0,046–0,065.

При исследовании зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь структур от частоты внешнего поля и от парциального давления кислорода было установлено, что повышение диэлектрической проницаемости и потерь при частоте выше 400 кГц может быть связано с недостаточным окислением гафния и образованием кислородных вакансий в пленке диоксида гафния.

Нагрев подложки приводит к изменению характеристик пленок HfO_2 . Был проведен анализ спектральной зависимости пропускания пленок, который показал, что повышение температуры подложки ведет к ухудшению оптических характеристик.

Также ширина запрещенной зоны составила 4,4 эВ при парциальном давлении кислорода $4,0 \cdot 10^{-2}$ Па и температуре подложки 573 К. При этом наилучшие значения ширины запрещенной зоны были получены при температуре подложки 303 К и были примерно равны 5,63 эВ. Таким образом, при увеличении температуры подложки значение E_g заметно ухудшается, что говорит о снижении качестве диэлектрика.

Установлено, что диэлектрическая проницаемость увеличивается до $\varepsilon=37$ при нагреве до 573 К, что является хорошим результатом. Однако при этом резко увеличиваются диэлектрические потери до $\text{tg}\delta=0,25$. Также наблюдается и снижение удельного объемного сопротивления. Эти процессы могут быть связаны с десорбцией кислорода из растущей пленки HfO_2 , что приведет к более низкой степени окисления металлического гафния.

Также было установлено, что повышение температуры подложки поспособствовало значительному росту величины диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь при частотах 20–40 кГц. При увеличении частоты внешнего поля до 100 кГц наблюдалось резкое снижение уровня ε и $\text{tg}\delta$.

Таким образом, установлено, что оптимальный диапазон температуры подложки должен составлять 300–423 К.

Наличие напряжения на мишени незначительно влияло на величину диэлектрической проницаемости. В тоже время при $U_m=40-80$ В происходило значительное снижение диэлектрических потерь. Дальнейшее повышение напряжения на мишени приводило к росту $\text{tg}\delta$. При $U_m=40$ В наблюдалось резкое увеличение ρ_v (почти в 5 раз), что свидетельствует об интенсификации взаимодействия между кислородом и гафнием.

Анализ оптических спектров показал, что дополнительная плазменная активация процесса реактивного ионно-лучевого распыления способствовала росту пропускания в ИК области спектра (800–900 нм).

Было установлено, что ширина запрещенной зона E_g находилась в пределах 4,37...4,39 эВ и практически не зависела от напряжения на мишени.

При проведении исследований характеристик пленок диоксида гафния, полученных распылением керамической мишени установлено, что добавка кислорода к аргону способствует увеличению пропускания в ИК диапазоне. Покртия имели желтоватую окраску и более низкую прозрачность в видимом диапазоне по сравнению с покрытиями, описанными выше.

Добавление в технологический процесс дополнительной высокотемпературной термообработки привело к улучшению оптических характеристик у образца, полученного при парциальном давлении кислорода $1,72 \cdot 10^{-2}$ Па и температуре подложки 303 К. Установлено, что термообработка вызвала снижение ширины запрещенной зоны E_g , что может быть связано с появлением кристаллической структуры в пленке HfO_2 .

Проведенные исследования показали, что термический отжиг пленок диоксида гафния, нанесенных на подложки из оптического стекла, привел к улучшению оптических характеристик только у образцов, полученных при низком парциальном давлении кислорода в рабочем газе и при нанесении пленок на горячую подложку. В процессе отжига происходило дополнительное окисление гафния и формирование кристаллической структуры, что способствовало росту пропускания и снижению поглощения в пленках HfO_2 . Также установлено, что после отжига поверхность стала более ровной, значительно уменьшилось значение средней шероховатости. До проведения термической обработки на поверхности имеются ярко выраженные наросты, которые были равномерно распределены по поверхности после проведения обработки.

Проведенные исследования показали, что термический отжиг пленок диоксида гафния, нанесенных на подложки из кремния, привел к улучшению общей морфологии поверхности и уменьшению среднего значения шероховатости. В процессе отжига происходило дополнительное окисление гафния и формирование кристаллической структуры, что может быть причиной улучшения качества поверхности в пленках HfO_2 . Термообработка привела к увеличению значений диэлектрической проницаемости и резкому снижению тангенса диэлектрических потерь.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

1–А. Зырянова, А.С. Оптические характеристики тонких пленок HfO_2 , полученных реактивным ионно-лучевым распылением/А.С. Зырянова (научный руководитель Е. В. Телеш) // 55-я юбилейная научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 22–26 апреля 2019 г. БГУИР, Минск, Беларусь: тезисы докладов. –Мн. –2019 г.– 649 с.; ил.– С. 299–300.

2–А. Зырянова, А.С. Влияние температуры подложки на оптические характеристики тонких пленок HfO_2 / А.С. Зырянова (научный руководитель Е. В. Телеш) //Электронные системы и технологии: сборник тезисов докладов 56-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, Минск,18–20 мая 2020г.– Минск: БГУИР,2020. –625с.; ил. – С. 323–325.

3–А. Зырянова, А.С. Исследование электрофизических параметров тонкопленочных структур HfO_2/Si , полученных реактивным ионно-лучевым распылением / А. С. Зырянова, Е. В. Телеш // Материалы и структуры современной электроники: сб. науч. тр. IX Междунар. науч. конф., Минск, 14–16 окт. 2020 г. / редкол.: В.Б. Оджаяев (отв. ред.) [и др.]– Минск: БГУ, 2020.– С. 51–55.

4–А. Зырянова, А. С. Частотные характеристики тонкопленочных структур $\text{Ni}/\text{HfO}_2/\text{Ni}$ / А. С. Зырянова, Е. В. Телеш // Материалы Республиканской научно-технической конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии 2020» – Минск. – 2020. – С. 334–336.

5–А. Зырянова, А. С. Реактивный ионно-лучевой синтез тонких пленок HfO_2 / А. С. Зырянова, Е. В. Телеш // Материалы VII Белорусско-китайского молодежного инновационного форума «Новые горизонты – 2020» – Минск: БНТУ. – 2020. – С. 91–93.

6–А. Зырянова, А.С. Влияние термического отжига на оптические характеристики тонких пленок HfO_2 : сборник материалов 57-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования БГУИР, Минск,19–23 апреля 2021 г. / редкол.: Д.В. Лихачевский и [др.] Минск: БГУИР,2021. –679 с.; ил. – С. 181–183.

7–А. Зырянова, А.С. Влияние термической обработки на характеристики тонких пленок диоксида гафния/А.С. Зырянова, науч. рук. Е.В. Телеш // Актуальные вопросы физики и техники [Электронный ресурс]: X Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов (Гомель, 22 апреля 2021 г.): материалы: в 2 ч. Ч. 1 / редкол. : Д. Л. Коваленко (гл. ред.) [и др.] ; М-во образования Республики Беларусь,

Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Электронные текстовые данные (15,5 МБ). – Гомел : ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – С. 91–96. Режим доступа: <http://conference.gsu.by>.

8–А. Зырянова, А. С. Исследование морфологии поверхности тонких пленок диоксида гафния / А. С. Зырянова // Материалы 58-й научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» – Минск: БГУИР, 2022.

Библиотека БГУИР