

06;07

Модификационная сканирующая рентгеновская микроскопия полупроводниковых структур с использованием оптики Кумахова

© А.Ю. Романов

Институт рентгеновской оптики, Москва

E-mail: androm2@yandex.ru

*Поступило в Редакцию 15 июня 2005 г.**В окончательной редакции 24 октября 2005 г.*

Впервые реализован модификационный вариант сканирующей рентгеновской микроскопии с использованием оптики Кумахова. Проведены радиационные испытания датчиков давления на основе „кремний на сапфире“-структуры в условиях лаборатории. В качестве источника ионизирующего излучения использовалась рентгеновская трубка, а также данная трубка, снабженная поликапиллярным рентгенооптическим элементом — среднефокусной линзой Кумахова.

PACS: 07.85.Tt

В [1] проведен сравнительный анализ процессов дефектообразования в МДП-структурах (металл–диэлектрик–полупроводник) под действием α - и β -облучения. Показано, что механизмы прямого смещения атомов в SiO_2 в случае α -облучения не дают существенного вклада в процессы генерации заряда в SiO_2 и на границе Si/SiO_2 . Исследования процесса релаксации механических напряжений в структурах Si-SiO_2 под действием α - и β -частиц также свидетельствуют о доминирующем вкладе ионизационных механизмов дефектообразования в МДП-структурах. Вышесказанное позволяет надеяться [1], что в дальнейшем для радиационных испытаний подобных структур — изменения зарядового состояния диэлектрика [2], плотности поверхностных состояний [3], можно будет использовать [4] более удобные источники ионизирующего излучения по сравнению с источниками α - и β -частиц, например рентгеновские.

Кроме того, облучение рентгеновским излучением (РИ) может применяться в технологии создания современных электронных структур с целью стимулирования тех или иных свойств, например, в [5] достигнуто повышение магниточувствительности планарно-диффузионных симисторных структур. Облучение рентгеновским излучением КНС-структур (кремний на сапфире) приводит к изменению микрорельефа поверхности, показателей преломления и коэффициентов экстинкции кремния и сапфира [6,7].

Одними из главных причин, определяющих специфику радиационных эффектов в системе диэлектрик-полупроводник, являются наличие механических напряжений в системе до облучения и их трансформация в процессе радиационного воздействия [1]. Имеется возможность применения рентгеновского облучения в технологическом процессе с целью уменьшения поверхностных межслоевых напряжений, что, возможно, даст улучшение эксплуатационных характеристик приборов. Предполагаемая модификация посредством РИ инициирует не только изменения электронной структуры материалов, но также и физико-химические процессы в них [1], что, возможно, приведет к уменьшению поверхностных механических напряжений на границе между слоями.

На сегодняшний момент процедура осуществляется термоциклированием. Применение же высокоинтенсивных пучков ядерных излучений затруднено как по причине труднодоступности ускорителей и реакторов, дороговизны времени работы, и неудобности использования радионуклидных источников, так и по причине возможности возникновения наведенной радиоактивности в готовых приборах. Таким образом, целесообразны и перспективны исследования влияния РИ на механические напряжения [8], что может быть полезно для технологии создания тензочувствительных элементов на основе КНС, применяемых для создания датчиков и преобразователей давления.

Оптика Кумахова дает возможность получения локальных плотностей РИ на уровне синхротронных источников в лабораторных условиях (так называемый „лабораторный синхротрон“) [9]. Такое свойство оптики Кумахова, как передача интенсивности РИ на значительные расстояния от источника, позволяет упростить задачу оптимального размещения оборудования, избежать негативных факторов воздействия источника.

В данной работе проведено экспериментальное исследование воздействия РИ, сфокусированного линзой Кумахова, на тензорезистор-

ный чувствительный элемент на основе КНС-структуры в составе датчиков давления серии МИДА (микроэлектронные датчики) [10]. Преследовались следующие цели: оценить устойчивость рабочих характеристик датчиков к ионизирующему излучению; диапазон экспозиций и плотностей потока излучения, при которых возможно проведение безмодификационной диагностики структур рентгеновскими методами (например, [11,12]), а также оценить возможность применения фокусированных пучков РИ для модификации данных микроэлектронных структур [8]. Все исследования проводились на специализированном стенде для исследования оптики Кумахова [13,14].

Использовалась среднефокусная линза Кумахова, изготовленная в институте рентгеновской оптики (ИРО), основные рентгенооптические параметры которой исследованы в [15,16]. Входной диаметр линзы — 3 mm, длина — 265 mm, переднее и заднее фокусные расстояния — 180 и 95 mm соответственно.

Повышение локальной плотности посредством линзы Кумахова позволяет сократить время воздействия для получения требуемой дозовой нагрузки, что весьма полезно для ускорения технологического цикла.

Подробные характеристики используемых для испытаний датчиков давления можно найти в [10]. Облучалась непосредственно сама полупроводниковая структура, доступная для обзора, находящаяся на торце датчика.

Первоначально в работе производилось облучение рентгеновской трубкой Oxford Instruments XTF 5011, с зеркальным вольфрамовым анодом, без рентгеновской оптики. Во время испытаний структура располагалась на расстоянии 1 cm от бериллиевого окна рентгеновской трубки (в ≈ 3 cm от фокусного пятна). Мощность трубки 50 W. Верхняя граница установленного на трубке высокого напряжения — 50 V. Трубка работала в режиме максимальной мощности (ток 1 mA), при этом поток рентгеновских фотонов с трубки в телесный угол 4π стерadian составлял $\sim 10^{13} \text{ s}^{-1}$.

Одновременно производился контроль изменения сопротивления мостовой схемы тензочувствительного элемента датчика. Происходили незначительные изменения, вызванные в основном тепловыми воздействиями от металлического корпуса рентгеновской трубки. Это выяснялось отключением источника РИ — изменения сохранялись. При отдалении же структуры от корпуса трубки происходила релаксация сопротивления к прежней величине. Таким образом, для проведения

мониторинга воздействия рентгена на структуру была обнаружена необходимость применения дополнительного средства для отсека тепловых воздействий.

Необходимо было либо удалить объект на достаточное расстояние от трубки, чтобы исключить чувствительность к теплу датчика, либо поставить тепловой экран, но и в том и в другом случае плотность потока излучения уменьшится. Нами же проблема была решена применением среднефокусной линзы Кумахова. Здесь используются передаточные свойства поликапиллярной оптики Кумахова. К тому же применение линзы Кумахова дает локальность в облучении и повышение плотности потока на объекте. На расстоянии около 0.5 м от фокусного пятна рентгеновской трубки на облучаемой структуре была получена такая же плотность излучения, как и на расстоянии в несколько сантиметров. Необходимо отметить, что приближение к источнику в нашем случае ограничено особенностью конструкции трубки — удаленностью фокусного пятна от выходного бериллиевого окна на 2 см, что является типичным для рентгеновских трубок.

Применялись различные варианты воздействия с применением оптики — пучок в различных сечениях: от максимального до минимального; причем осуществлялось последовательное воздействие фокусированным излучением (сканирование) на всю поверхность микроэлектронной структуры. Максимальная длительность воздействия достигала 3 ч. Таким образом, максимальная плотность потока на структуре составляла $\sim 10^{10}$ photon/(s · mm²), максимальный интегральный флюенс — $\sim 10^{14}$ photon/mm² в энергетическом диапазоне РИ 5–50 keV.

Применение фокусирующей до микронных размеров пучка рентгеновской оптики совместно с последовательным перебиранием точек воздействия с целью модификации можно рассматривать как новый вариант сканирующей рентгеновской микроскопии [12] — модификационной сканирующей рентгеновской микроскопии полупроводниковых структур с использованием оптики Кумахова, что реализовано в данной работе впервые.

Несмотря на воздействие рентгеновским излучением, никаких значительных изменений в технологических и эксплуатационных характеристиках приборов, проверенных впоследствии, не произошло.

Таким образом, опробована методика применения линзы Кумахова для радиационных испытаний, показавшая себя удобной и перспективной. Обнаружена высокая радиационная стойкость исследованных

структур. Для возможного применения рентгеновского излучения в технологии данных и других подобных структур с целью модификации электронной структуры материалов целесообразно опробовать более высокие плотности излучения.

Выражаю благодарность А.В. Пирогову, В.М. Стучебникову („Мидаус“, г. Ульяновск) за предоставленные образцы и организацию измерений параметров датчиков, С.В. Никитиной и сотрудникам (ИРО, технологический отдел; г. Москва) за предоставленную линзу Кумахова.

Список литературы

- [1] *Васин С.В.* Физико-химические процессы в МОП-структурах, облученных альфа- и бета-частицами: Дис. . . . к. ф.-м. н.: 01.04.10. Ульяновск: УлГУ, 1999. 158 с.
- [2] *Романов А.Ю., Тулвинский В.Б., Васин С.В.* // Учен. зап. Ульяновского гос. ун-та. Сер. Физ. 2002. № 1 (12). С. 78–84.
- [3] *Васин С.В., Тулвинский В.Б., Шипатов Э.Т.* // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 16. С. 59–62.
- [4] *Бормонтов Е.Н., Левин М.Н., Гитлин В.Р.* и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 9. С. 73–81.
- [5] *Воронцов С.И., Бакланов С.Б., Гурин Н.Т., Новиков С.Г.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 19. С. 37–42.
- [6] *Киселёв А.Н., Перевоицков В.А., Скупов В.Д., Филатов Д.О.* // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. В. 17. С. 35–39.
- [7] *Киселёв А.Н., Перевоицков В.А., Скупов В.Д., Филатов Д.О.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 23. С. 8–12.
- [8] *Романов А.Ю.* // Мат. 6-й междунар. конф. „Опто-, наноэлектроника, нанотехнологии и микросистемы“. Ульяновск: УлГУ, 2004. С. 163.
- [9] *Романов А.Ю., Дмитриев И.В.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 18. С. 65–69.
- [10] *Бушев В.В., Николайчук О.Л., Стучебников В.М.* // Датчики и системы. 2000. № 1. С. 21.
- [11] *Романов А.Ю., Черник В.Н.* // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 22. С. 53–57.
- [12] *Гелевер В.Д., Романов А.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 5. С. 52–57.
- [13] *Романов А.Ю.* // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. № 1. С. 34–39.
- [14] *Романов А.Ю., Дмитриев И.В., Акулов А.Ю.* // Поверхность. 2005. № 2. С. 17–22.
- [15] *Романов А.Ю.* // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. В. 5. С. 47–51.
- [16] *Романов А.Ю.* // Поверхность. 2005. № 8. С. 49–51.