

## Радиационная стимуляция

### Новые перспективы в микроэлектронике

Хорошо известны такие методы обработки полупроводниковых материалов радиационным излучением, как ядерное легирование, радиационное управление процессами диффузии, радиационная коррекция параметров полупроводниковых структур (например, времени жизни и подвижности носителей), и, наконец, один из основных современных технологических процессов — ионная имплантация. Все эти операции характеризуют высокие дозы поглощенного излучения и, как правило, введение в обрабатываемый материал большого числа дефектов. Однако существуют и технологические процессы, стимулируемые ионизирующим излучением низкой интенсивности с узким энергетическим спектром. При такой обработке радиационные дефекты практически отсутствуют. К ним можно отнести радиационную стимуляцию синхротронным излучением кольцевого ускорителя электронов с широким диапазоном регулировки по энергии и интенсивности.

**Т**еория и практика применения в микроэлектронике радиационного излучения и, в частности, синхротронного — предмет многочисленных публикаций и обсуждений [1–6]. В Московском инженерно-физическом институте предложен новый метод стимуляции технологических процессов с использованием излучения, генерируемого в результате распада короткоживущих изотопов. Изотопы возникают в радиационном контуре, созданном на линейном ускорителе электронов.

Суть работы радиационного контура следующая: линейный ускоритель электронов активизирует жидкое или газообразное рабочее вещество, которое затем перекачивают в технологическую установку, где специальное устройство — облучатель создает поле излучения в котором протекает технологическая реакция. После этого рабочее вещество вновь поступает на активацию. Получаемый таким образом замкнутый цикл активации и распада короткоживущих изотопов позволяет создавать и поддерживать в активной зоне технологической установки постоянное и равномерное поле низкоинтенсивного облучения, отделенного от активной зоны мощного излучения ускорителя. Этот принцип получения и подвода стимулирующего излучения к технологической зоне имеет следующие достоинства:

- возможность выделения единственного вида протекающей ядерной реакции и, как следствие, однозначность и регулируемость параметров полей облучения;

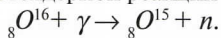
- организация транспортирующих активное вещество коммуникаций (трубопровода) изогнутой формы и малой протяженности, благодаря чему можно работать с короткоживущими изотопами верхней части таблицы элементов Менделеева;

- возможность быстрого включения-выключения подачи излучения в технологическую зону;

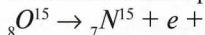
- экологичность, относительная дешевизна, простота эксплуатации метода и установки.

Применение метода радиационной стимуляции можно проиллюстрировать на примере технологического процесса формирования термическим окислением тонкого затворного оксида МДП-

структуры. Для этого пучок электронов с максимумом центра тяжести энергетического спектра 26 МэВ и средним током 12 мкА из ускорителя направляют на вольфрамовую мишень (рис.). Попадая на мишень, электроны генерируют тормозное гамма-излучение. Гамма-кванты в активаторе, заполненном деионизованной водой, активизируют в фотоядерной реакции кислород  $O^{16}$ :

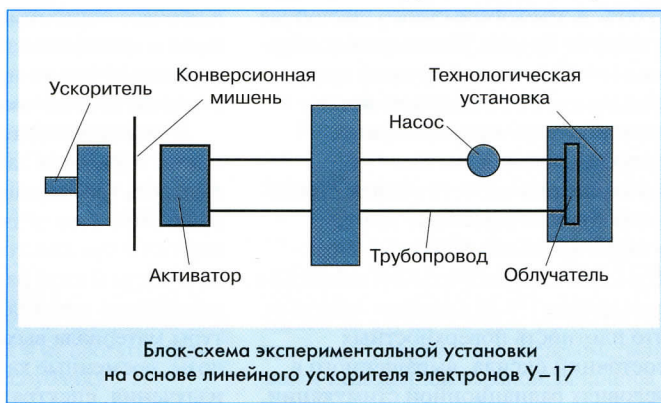


В соответствии с реакцией



происходит распад изотопа  ${}_8O^{16}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 123$  с.

Получаемый позитрон аннигилирует практически мгновенно с образованием двух гамма-квантов со средним значением спектра излучения — 0,511 МэВ. Время жизни изотопа кислорода в составе молекулы воды достаточно для перекачки в облучатель технологической установки “радиоактивной” воды по транспортной магистрали с помощью насоса. В экспериментальной установке У-17 в качестве облучателя использован водяной контур охлаждения термо-



Блок-схема экспериментальной установки на основе линейного ускорителя электронов У-17

окислительной системы “Изоприн-5М”. Его конструкция обеспечивает полный охват зоны окисления полупроводниковых пластин и формирование эффективного поля облучения. Другой приемлемый вариант ввода излучения в активную зону окислительной печи — применение в радиоактивном контуре газообразного кислорода, выполняющего функции как рабочего вещества, так и окислителя. При широком использовании окисления в парах воды “радиоактивная” жидкость может поступать в барбатер для увлажнения окислителя, создавая “радиоактивный” пар

непосредственно в зоне окисления. Таким образом, в активной зоне окислительной установки создают стимулирующее технологический процесс поле гамма-излучения со средней мощностью дозы на облучателе около 5 мкГр/с (в 2π).

Разделение в данном случае “грязной”, радиационной, и “чистой”, технологической, зон обеспечивает радиационную безопасность персонала и позволяет при организации единой радиационно-технологической магистрали, наподобие магистрали подачи сжатого воздуха, одновременно обслуживать несколько технологических установок термического окисления.

На опытной установке проведена серия экспериментов по выращиванию тонкого слоя оксида на пластинах кремния в атмосфере сухого кислорода. Исследовали партии образцов двух типов: с оксидом, выращенным по обычной методике, и оксидом, выращенным при облучении стимулирующим низкоинтенсивным гамма-излучением аннигиляционного спектра. Слой оксида толщиной около 0,12 мкм выращивали на кремнии марки 172 КЭФ4 с кристаллографической ориентацией <100> при температуре 1200°C в атмосфере сухого кислорода в течение 20 мин. Исследуемые образцы (по 20 в каждой группе) представляли собой структуры металл — тонкий оксид — полупроводник размером 40x40 мкм. Для установления свойств оксида применяли хорошо известные методы измерения вольт-фарадных характеристик и высокополевой инжекции электронов [7]. Измерения показали, что плотность поверхностных состояний оксида, выращенного в условиях радиационной стимуляции, равна примерно  $5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ , а пробивное напряжение — 70 В. Это, соответственно, на порядок меньше и на 30% выше, чем в образцах, обработанных по традиционной технологии. При определении радиационной чувствительности оксида на имитационной установке высокополевой инжекции электронов было установлено, что сдвиг порогового напряжения в радиационно-стимулированном оксиде при эквивалентной радиационной дозе  $10^5$  рад составил 0,2 В, а в обычном образце — 1,0 В.

Таким образом, экспериментальные исследования влияния низко-

интенсивного излучения, формируемого предложенным нами методом, на технологический процесс изготовления элементов микроэлектронных схем показали возможность значительного улучшения ряда характеристик полупроводниковых структур и приборов. Такие же выводы можно сделать и на основе аналогичных предварительных исследований других технологических процессов: анизотропного травления кремния, химической отмывки пластин и т.п.

Для объяснения наблюдаемого воздействия предложена следующая физическая модель. Одна из основных реакций твердого тела на радиационное воздействие — возбуждение фононов. Фононы переносят значительную часть поглощенной кристаллом энергии ионизирующего излучения. Их энергетический спектр определяет вид излучения, состав и кристаллическая структура облучаемого материала. Таким образом, при перемещении по материалу, отражении от поверхностей пластины и т.п. генерированные излучением фононы подводят дополнительную энергию, определяемую их энергетическим спектром, к энергетическим связям в кристалле. Естественно, ввод дополнительной энергии в процесс обработки полупроводникового кристалла изменяет как параметры самого процесса, так и свойства обрабатываемого материала.

Изменение специфики радиационной обработки заставляет пересмотреть требования к параметрам радиационного воздействия. На первый план вместо поглощенных доз, числа и вида радиационных нарушений кристаллической структуры материала выходят мощность дозы, временные характеристики излучения, спектральные характеристики возбужденных излучением фононов, плотность вероятности участия фонона в реакции и т.п. Таким образом, при использовании предлагаемой физической модели мы имеем дело с радиационным воздействием низкой интенсивности, т.е. с эффектами, которые нельзя объяснить накоплением радиационных дефектов. Следует изменить и подход к рассмотрению эффектов радиационного воздействия на материал. В данном случае происходит радиационная стимуляция протекающих в материале процессов, таких как диффузия, перераспределение

примесей и зарядов, образование, дрейф и распад дефектных комплексов, протекание химических реакций и т.п. Все эти процессы протекают так же, как и в обычных условиях. Отлична только их динамика благодаря подводу фононами дополнительной энергии.

По нашему мнению, предложенная низкоинтенсивная радиационная стимуляция технологических процессов может стать перспективным средством улучшения свойств элементной базы современной радиоэлектронной аппаратуры, в первую очередь ее надежности и радиационной стойкости. Дальнейшее развитие метода и его технических средств потребует создания количественных физико-технологических моделей процессов низкоинтенсивной радиационной стимуляции с целью оптимизации вида, энергии, плотности потока ионизирующих воздействий, вида и режимов технологических операций, оценки предельных возможностей метода и т.п. Необходимы также всесторонние экспериментальные исследования, как технологических, так и метрологических, в том числе тонких методов исследования получаемых структур и образцов. И конечно, внедрение метода в производство современных интегральных схем невозможно без создания серьезной научно-технической и финансово-организационной базы.

#### Литература

1. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники. — М.: Сов. радио, 1980.
2. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. — М.: Мир, 1985.
3. Джафаров Т.Д. Радиационно-стимулированная диффузия в полупроводниках. — М.: Энергоиздат, 1991.
4. Кулипанов Г.Н. Последние результаты исследований с помощью СИ. — Труды Национальной конференции по применению рентгеновского, синхротронного излучений, нейтронов и электронов (РСНЭ-97), Дубна, 25—29 мая 1997 г.
5. Мотягин А.И., Сухарев А.А., Яненко В.В. Радиационный контур для получения полей облучения. Авт. свид. № 1807791/1990.
6. Козин О.В., Болисов В.А., Попов В.Д. Комплексный подход к определению качества тонкого подзатворного оксида КМОП ИМС. Физика окисных пленок: Тезисы докладов III Всесоюзной конференции, ч. II, Петрозаводск, 1991.
7. Holloman J.H., Vaurer R., Seitz F. Imperfections in Nearly Perfect Crystals (ed. W. Shockley), Wiley, New-York, 1952.

Координаты для контактов:

Факс: 324-21-11

E-mail: ivan@d408.micro.mephi.ru