

М. А. ГЛАУБЕРМАН, О. А. КУЛИНИЧ, Н. Н. САДОВА

Учебно-научно-производственный центр
при Одесском национальном университете им. И. И. Мечникова

ДЕТЕКТОР ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ МОП-ТРАНЗИСТОРА

Предлагается прибор для детектирования малых и средних доз ионизирующих излучений, который основан на использовании полевого транзистора с изолированным затвором. Главной особенностью изготовленного детектора является то, что он формировался по обычной МОП технологии, дополненной некоторыми методиками контроля на каждом этапе создания.

Метод детектирования основан на том, что при действии ионизирующих излучений по мере накопления электрического заряда в толстом диэлектрическом слое затвора модулируется проводимость области пространственного заряда, через который проходит электрический ток. Таким образом, связывая величину поглощенной дозы с изменением электрического тока, который течет через транзистор, можно определить величину поглощенной дозы ионизирующих излучений.

Возможность детектирования поглощенной дозы ионизирующих излучений с помощью МОП-транзисторов определяется тем фактом, что при облучении МОП-транзистора, например гамма квантами или нейтронами, в диэлектрике накапливается положительный либо отрицательный заряд [1]. Накапливаясь в тонком слое диэлектрика на границе перехода диэлектрик—полупроводник, эти заряды своим электрическим полем модулируют проводимость канала между истоком и стоком. Чем больше накапливается зарядов в приграничном слое, тем больше эта модуляция. Количество накопленного заряда зависит от величины поглощенной дозы ионизирующих излучений и свойств диэлектрика. Установлено, что в оксиде кремния под действием ионизирующих излучений накапливается положительный заряд, обусловленный ионизацией глубоко залегающих в запрещенной зоне «донорных» уровней и захватом положительно заряженных дырок. В оксиде алюминия под действием ионизирующих излучений накапливается отрицательный заряд, обусловленный захватом электронов на «акцепторные» уровни в запрещенной зоне диэлектрика.

Изменение проводимости канала МОП-транзисторов под действием ионизирующих излучений приведет к изменению тока, текущего через канал. Таким образом, если установить зависимость величины изменения канального тока от величины поглощенной дозы, можно по градуировочным прямым определить величину поглощенной дозы ионизирующих излучений. На практике измеряют не величину изменения тока, а, фиксируя канальный ток, измеряют величину изменения затворного напряжения (U_g), необходимое для получения заданного фиксированного тока. Для малых и средних значений поглощенной дозы (от 100 до 1000 рад) хорошо выполняется зависимость $U_g \sim D$ (для толщин оксидов менее 0,5 мкм).

Основными проблемами при проектировании и производстве детекторов поглощенной дозы ионизирующих излучений являются хорошая

воспроизводимость параметров, их стабильность и хорошая чувствительность к ионизирующим излучениям. Установлено, что временной и термополовой дрейф параметров МОП-транзисторов зависит от толщины оксида по закону $U_g \sim d$. Чем толще оксид, тем наблюдается большая нестабильность параметров МОП-транзисторов. Эта нестабильность обычно связывалась с наличием ионов быстродиффундирующих примесей, например, ионов калия и натрия. Эксперименты, проведенные для выяснения механизмов проникновения этих ионов в оксид показывают, что они могут попасть в оксид в процессе окисления при использовании кварцевой посуды и кварцевых держателей. Попадая на границу раздела оксид-кремний, эти ионы изменяют зарядовое состояние границы раздела и, значит, ширину канала в МОП-транзисторе. Например, в p -МОП транзисторе обогащенного типа с n -каналом, ионы натрия или калия скапливаясь на границе раздела способствуют увеличению ширины канала, так как ширина зоны пространственного заряда увеличивается. Проводимость канала при этом уменьшается. При фиксированном токе сток-исток это эквивалентно увеличению обратного затворного напряжения. На величину затворного напряжения влияют также структурные и точечные дефекты, находящиеся на границе оксид-кремний со стороны кремния. Наличие этих дефектов приводит к изменению концентрации основных носителей зарядов и изменению зарядового состояния границы раздела. Эти изменения приводят к изменению положения уровня Ферми, высоты потенциального барьера и, следовательно, к изменению напряжения плоских зон и порогового напряжения.

В процессе изготовления предлагаемого детектора осуществлен комплекс исследований современными методами исследований, такими как: электронная сканирующая микроскопия с рентгеновским микроанализом, вторичная ионная масс-спектрометрия, ОЖЭ-электронная спектроскопия как исходных кремниевых пластин и структур оксид—кремний, так и готовых конеч-

ных структур. Проведенные исследования позволили установить, что основными примесями исходного кремния являются кислород и углерод. Считается, что углерод не создает электрически активные центры в кремнии [2]. За электрическую активность ответственны соединения типа SiC, которые обнаружены не были. Кислород создает электрически активные донорные уровни при температурах около 1150 градусов. Поскольку процессы окисления проходят именно при этих температурах, можно предположить, что в окисленном кремнии кислород находится в электрически активном состоянии. Кислород, находясь в электрически активном состоянии, создает донорные состояния и, тем самым, влияет на концентрацию основных носителей зарядов на границе перехода и в объеме кремния.

После травли оксидных слоев с поверхности кремния и обработки в избирательных травителях Сиртля (поверхность (111)) и Сэко (поверхность (100)) наблюдалось образование дислокационных сеток, состоящих из полных 60-градусных краевых дислокаций. Рентгеновский микроанализ позволил установить, что дислокации в сетках преципитированы кислород-вакансионными комплексами, создающими хорошо известные атмосферы Коттрела. Эти комплексы располагались в районах ядер дислокаций, т. е. в областях максимального изменения деформационного потенциала. Поскольку кислород в окисленном кремнии электрически активен и располагается в районе ядер дислокаций, он будет влиять на электрическую активность дислокаций, в частности, на величину зоны пространственного заряда дислокаций. Это влияние приведет к изменению времен рассеяния носителей зарядов на дислокациях и при больших плотностях дислокаций приведет к изменению результирующей подвижности. Так, например, в *p*-кремнии краевые 60-градусные дислокации создают энергетические донорные уровни. При этом, вокруг «ненасыщенных» или «болтающихся» связей в ядре дислокации образуется зона пространственного заряда. Кислород, скапливаясь в ядре дислокации, образует дополнительные донорные уровни, что увеличивает зону отрицательного пространственного заряда дислокации. Время рассеяния на дислокации носителей зарядов уменьшается, что приведет к уменьшению подвижности при рассеянии на дислокациях и к уменьшению результирующей подвижности.

Все вышеприведенные факты приводят к тому, что расчетные вольт-амперные характеристики МОП-транзисторов на несколько порядков отличались от экспериментально полученных. Кроме того, рентгеновский микроанализ структур оксид-кремний позволил обнаружить на границе раздела слой оксида с нарушенной стехиометрией. Толщина этого слоя составляла до 50 ангстрем, причем была тем больше, чем была больше толщина оксида. По-видимому, этот слой состоял из поликристаллического или аморфного оксида. Как было указано выше, величина термополевой и временной нестабильности параметров МОП-транзисторов была выше

при увеличении толщины оксида. Но при увеличении толщины оксида не только увеличивается количество ионов натрия и калия, но и увеличивается толщина переходного нарушенного слоя оксида. Кроме того, ОЖЭ-электронный анализ показал почти полное отсутствие ионов легкодиффундирующих примесей в объеме оксида и на границе раздела оксид-кремний. При этом, термополевая и временная нестабильность оставались на высоком уровне. Очевидно, что эти нестабильности можно связать с наличием энергетических уровней в запрещенной зоне оксида, связанные с образованием переходного слоя с нарушенной стехиометрией.

Хорошо известно, что радиационная чувствительность оксидов к поглощенной дозе ионизирующих излучений тем выше, чем больше толщина оксидов. Связать увеличение радиационной чувствительности только с тем фактом, что при увеличении толщины оксида увеличивается количество положительного заряда во всем объеме оксида нельзя, т. к. все процессы диффузионного и полевого движения зарядов после воздействия излучения к границе раздела ограничены временами рекомбинации. Время движения зарядов к границе должно быть больше времени рекомбинации. Этот процесс прямо не связан с толщиной оксида. Остается предположить, что при увеличении толщины оксида увеличение радиационной чувствительности можно связать с увеличением толщины переходного слоя на границе оксид—кремний. При этом увеличивается количество энергетических уровней с которых при облучении инжектируются электрические заряды, которые, попадая в поле барьерного потенциала, перемещаются в кремний.

Таким образом, термополевой и временной дрейф параметров МОП-транзисторов и радиационная чувствительность, по-видимому, связаны с наличием переходного слоя оксида с нарушенной стехиометрией. Этот факт подтверждается полученными экспериментальными данными, в соответствии с которыми увеличение радиационной чувствительности хорошо коррелирует с термополевой и временной нестабильностью параметров МОП-транзисторов, применяемых в качестве детекторов поглощенной дозы ионизирующих излучений. Исходя из вышеприведенного, можно сделать вывод, что при проектировании и изготовлении детекторов поглощенной дозы ионизирующих излучений необходимо решать задачи термополевой и временной нестабильности параметров одновременно с решением задачи повышения радиационной чувствительности.

Предлагаемый детектор спроектирован и изготовлен на основе МОП-транзистора по обычной планарной МОП-технологии с привлечением дополнительных технологических операций, позволяющих контролировать процесс изготовления начиная с контроля исходных пластин кремния заканчивая готовыми структурами. Дополнительные технологические операции включали замену обычных процессов термического окисления процессами окисления в атмосфере кислоро-

да в присутствии паров 1,5% HCl при температуре 1150 градусов с последующим отжигом в атмосфере азот + оксихлорид фосфора при температуре 900 градусов в течение 10 мин. В некоторых случаях для получения толстого оксида ($d \sim 1$ мкм) для устранения дрейфа примесей и нейтрализации влияния переходного слоя оксида применялось окисление в среде трихлорэтилена и кислорода с расходом трихлорэтилена 6 л/ч и расходом кислорода 100 л/ч. При этом наблюдалась минимальная плотность поверхностных состояний на границе оксид—кремний, минимальные толщины переходного слоя оксида и требуемые значения радиационной чувствительности.

Изготовленный детектор на основе МОП-транзистора имел следующие параметры:

Длина канала	10 мкм
Ширина канала	1500 мкм
Толщина оксида затвора	1 мкм
Исходный кремний	КЭФ 4,5

При этом реализовались следующие параметры:

Начальное напряжение затвора	4 В
Временной дрейф (20 с)	5 мВ
Коэффициент температурной неустойчивости	12 мВ/град
Чувствительность к γ -излучению ($E=1,2$ МэВ; $P=0,1$ Мрад/с)	3 мВ/рад
Диапазон измерения поглощенной дозы	100—5000 рад
Изменение затворного напряжения после выдержки 250 ч	20%
Изменение радиационной чувствительности после выдержки 250 ч	20%

Предлагаемый к производству детектор может быть модернизирован в зависимости от требуемого диапазона его возможного применения.

Литература

1. Винецкий Л., Чайка Г. Е., Шевченко Е. С. Динамика встраивания заряда при облучении МДП структуры // ФТП. — 1982. — Т. 16. — Вып. 8. — С. 1478—1482.
2. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. — М.: Мир, 1984. — 472 с.