

Перспективные методы контроля зарядовой нестабильности подзатворного диэлектрика МДП-приборов

77-30569/332565

04, апрель 2012

Лоскутов С. А., Драч В. Е., Чухраев И. В.

УДК.621.38.53

КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана

SergeL-75@ya.ru

drach@kaluga.org

igor.chukhraev@mail.ru

1. Введение

Основным фактором, определяющим деградацию полупроводниковых приборов на основе структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), является дефектность подзатворного диэлектрика, что влияет на рабочие характеристики МДП-приборов. Изменение зарядового состояния подзатворного диэлектрика МДП-транзистора приводит к сдвигу порогового напряжения, изменению крутизны и дрейфу характеристик прибора [1]. Зарядовая нестабильность диэлектрической пленки также ответственна за деградацию характеристик запоминающих устройств с плавающим затвором и приборов с зарядовой связью [1]. Повышение интереса к исследованию процессов зарядовой нестабильности МДП-структур в условиях инжекции носителей в настоящее время связано с тем, что с повышением степени интеграции КМДП-ИС происходит уменьшение длин каналов и толщин подзатворного диэлектрика интегральных МДП-транзисторов. Поэтому возрастает роль процессов в МДП-структурах, связанных с влиянием сильных электрических полей, которые по своей величине приближаются к инжекционным. Например, фирма Intel использует транзисторы с толщиной подзатворного диэлектрика 1,2 нм (1,4 нм у фирмы AMD) при рабочих напряжениях около 1 В. В таких диэлектриках величина электрического поля достигает значений 10 МВ/см.

Инжекция «горячих» носителей в диэлектрик МДП-структур в таких полях приводит к изменению зарядового состояния диэлектрика, повышению плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник-диэлектрик и, в конечном итоге, к необратимой деградации подзатворного диэлектрика. Конечно, срок службы

может быть увеличен уменьшением рабочего напряжения, но это неизбежно снижает скорость работы транзистора, что не является выходом из положения.

2. Обзор методов контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник

Коротко рассмотрим современные методы контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник и транзисторов на их основе.

На этапе контроля структур применяются широко известные в физике методы – оптическая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия (SEM), просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения (TEM), рентгеновская дифракция (XRD), атомно-силовая микроскопия (AFM) и другие. Например, SEM является очень распространенным, оперативным и удобным методом контроля геометрических размеров создаваемых структур – транзисторов, металлических слоев и омических контактов между ними. При помощи этой же аппаратуры можно определять и некоторые электронные свойства структур, а также контролировать количество дефектов на поверхности пластины. Метод TEM чаще применяется для анализа сечений транзисторов, поскольку их размеры настолько малы, что разрешения SEM просто не хватает. Также этот метод можно использовать и для элементного (химического) анализа полупроводниковых слоев. При помощи различных традиционных методов поверхностного анализа измеряется профиль легирования слоев кремния атомами примеси (B, P, As). Для анализа дефектов в приповерхностном слое кремния служит SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometer). С помощью фотоэлектронной микроскопии измеряют концентрацию азота в диэлектрике затвора, а с помощью атомно-силовой микроскопии (AFM) определяют шероховатость (неровность) поверхностей и размер зерен осаждаемых в производстве материалов.

В качестве электрических тестов можно отметить тесты на электромиграцию и на диэлектрический пробой. Полные тесты электромиграции в омических контактах и межсоединениях необходимы для определения качества омических контактов в межсоединениях ИМС. Для теста на пробой диэлектрика применяются стресс-тесты при повышенном напряжении, при повышенной температуре и на транзисторах большей площади. Полученные результаты экстраполируются на реальные размеры и условия работы транзисторов, и с учетом допустимой величины тока утечки вычисляется среднее время наработки на отказ.

Вышеуказанные методы относятся к так называемым «разрушающим» методикам, применение которых на готовых структурах невозможно. Однако, наряду с «разрушающими» методиками, применяются методы неразрушающего контроля, как на

стадии формирования полупроводниковых слоев, так и на стадии тестирования и модификации уже сформированных структур. Опять же, опираясь на пример фирмы Intel [2], можно рассмотреть систему методик под общим названием Silicon Debug. Методы Silicon Debug позволяют: во-первых, фиксировать проблему, причем неразрушающим способом, а во-вторых, по возможности устранить ее. Причем разрешающая способность методов Silicon Debug позволят работать с дефектами вплоть до уровня одного транзистора. В настоящее время эти методы тесно интегрированы в производственный процесс фирмы Intel. Наиболее часто используются следующие методики, входящие в Silicon Debug: оптическая диагностика структур с помощью микрозонда на основе импульсного лазера ближнего инфракрасного диапазона (Laser Probe), Time-Resolved Emission (спектроскопия с временным разрешением), электрофизические методы исследования зарядового состояния подзатворного диэлектрика. Здесь необходимо отметить как традиционно применяемые методы диагностики, так и методы, определенные стандартом JESD35-A [3]. Данные методы предназначены для использования в технологии производства и контроля ИМС на основе МДП-структур и позволяют более качественно проводить оценку общей целостности тонких диэлектриков. Представлены три основных метода: метод управляемого напряжения (V-Ramp), метод изменяемого токового воздействия (J-Ramp), метод постоянного тока (Bounded J-Ramp). Каждый из указанных методов разработан с точки зрения удобства, простоты и оперативности его применения.

Большой научный и практический интерес представляет изучение зарядовой нестабильности МДП-структур в условиях инжекции заряда в диэлектрическую пленку в сильных электрических полях. В результате изучения процессов, происходящих при инжекции заряда в диэлектрик, появляется возможность определить механизмы деградации и критические режимы работы полупроводниковых приборов, а также наметить пути совершенствования технологии получения диэлектрических пленок, направленные на создание высоконадежных приборов [4].

Более того, базируясь на полученных знаниях, возможно получить методы неразрушающего и экспресс контроля подзатворного диэлектрика МДП-структур. Также, за счет того, что механизмы зарядовой деградации в сильном электрическом поле сходны с механизмами при воздействии высокоэнергетических излучений, возможна разработка методик имитационных испытаний, что также является перспективным [5].

3. Процессы зарядовой деградации МДП-структур в сильных электрических полях и методы ее контроля

Рассматривая существующие в настоящее время модели зарядовых явлений в термически выращенных пленках SiO_2 и SiO_2 -ФСС на кремнии при воздействии сильных электрических полей можно отметить, что процессы зарядовой деградации МДП-структур $\text{Si-SiO}_2\text{-Al}$ и $\text{Si-SiO}_2\text{-ФСС-Al}$ исследованы недостаточно, имеющиеся данные противоречивы. Особый интерес представляет изучение зарядовой деградации МДП-структур в сильных электрических полях, приводящих к инжекции носителей заряда в диэлектрическую пленку. Наибольший вклад в зарядовую нестабильность подзатворного диэлектрика при сильнополевой туннельной инжекции вносят следующие основные процессы: захват электронов на уже существующие и вновь создаваемые ловушки [6], протекающий вплоть до пробоя образца, накопление положительного заряда; возрастание плотности поверхностных состояний на границе Si-SiO_2 .

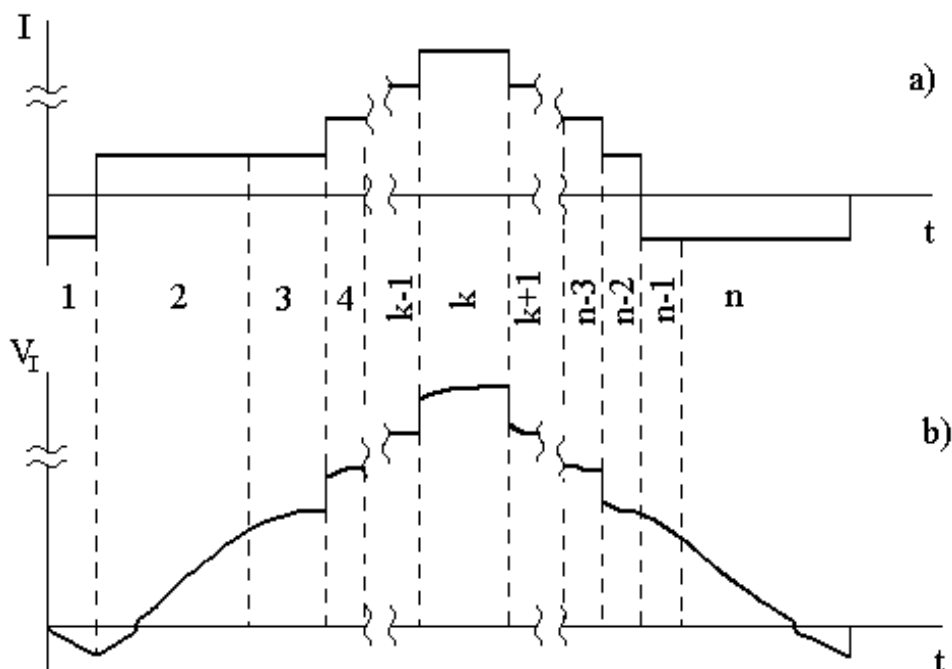
Интересно то, что, не смотря на бурное развитие технологии производства МДП-приборов, в настоящее время релаксация зарядового состояния МДП-структур в сильных электрических полях в условиях управляемой инжекции электронов в диэлектрик до конца не изучена. Существующие на настоящий момент модели релаксации зарядового состояния также не учитывают, как правило, процессы релаксации зарядового состояния МДП-структур в сильных электрических полях. Это связано, по-видимому, с недостатком экспериментальных данных и отсутствием совершенной методики исследования релаксирующих зарядов. Однако релаксирующая компонента заряда во многом определяет надежность работы приборов на основе МДП-структур в предпробивных режимах и ее необходимо учитывать при комплексной оценке зарядовой нестабильности МДП-структур, работающих в критических режимах и на высоких частотах.

Для исследования параметров релаксирующей компоненты зарядового состояния МДП-структур, возникающей в сильных электрических полях, традиционно используются методы вольт-фарадных (C-V) характеристик, термостимулированной деполяризации, зарядовой накачки и т.д. Данные методы подробно описаны в литературе [6], поэтому не будем в рамках данной публикации останавливаться на их особенностях. Однако информативность этих известных методов для анализа быстрорелаксирующих зарядов в сильных электрических полях мала. К недостаткам данных методов следует отнести то, что они оценивают зарядовое состояние МДП-структур в области слабых электрических полей, соизмеримых с внутренним полем зарядов в диэлектрике. При этом из рассмотрения исключаются компоненты заряда в диэлектрике и на границе раздела, появляющиеся в сильных электрических полях и исчезающие при снятии электрического

поля. Применение перечисленных выше методов исследования требует перекоммутации исследуемого образца после воздействия, что значительно снижает достоверность получаемых результатов. Определение параметров быстро релаксирующих компонент заряда, генерируемых сильнополевым воздействием, с помощью данных методов либо принципиально невозможно, либо затруднено, так как их реализация предполагает снятие сильного электрического поля и проведение измерений в режиме медленного изменения напряжения смещения или температуры.

Соответственно, наиболее интересным и продуктивным методом в этом случае становится метод токовой нагрузки, предложенный в [7]. Необходимо отметить, что данный метод, несмотря на то, что был предложен весьма давно, постоянно совершенствуется, в результате чего повышается информативность и расширяются границы его использования.

Описываемый метод основан на приложении к исследуемой МДП-структуре токовой нагрузки по специальному алгоритму и измерении временной зависимости напряжения $V(t)$ на образце, как показано на рисунке. В качестве информативного параметра, характеризующего изменения зарядового состояния МДП-структуры, используется напряжение, падающее на структуре при заданной величине тока туннельной инжекции V_I .



Первоначально на МДП-структуру подается импульс постоянного тока амплитудой I , при котором происходит заряд емкости МДП-структуры и переход ее в режим туннельной по

Фаулеру-Нордгейму инъекции электронов в диэлектрик. Поскольку в МДП-структурах с термической пленкой SiO_2 основным механизмом, характеризующим изменение зарядового состояния в сильных электрических полях, является накопление положительного заряда, то была выбрана положительная полярность токового воздействия, обеспечивавшая инъекцию электронов из кремния и накопление положительного заряда у границы Si-SiO_2 . Амплитуда тока I_1 выбирается таким образом, чтобы длительная выдержка структуры при данной токовой нагрузке в течение времени, необходимого для исследования релаксационных процессов, не приводила к заметным изменениям зарядового состояния образца.

После прекращения заряда емкости МДП-структуры и перехода ее в режим инъекции заряда амплитуду импульса тока ступенчато увеличивают до значения I_2 . Амплитуда тока I_2 выбирается, исходя из условия интенсивной генерации положительного заряда в пленке SiO_2 . Накопление положительного заряда контролируется по изменению напряжения на структуре V_1 . После инъекции в диэлектрик требуемой величины заряда осуществляется ступенчатое уменьшение амплитуды тока до значения I_1 . Величина положительного заряда, сгенерированного туннельной инъекцией электронов и захваченного в окисле, контролируется по временной зависимости изменения напряжения V_1 при токе I_2 . По разнице значений напряжения V_1 , измеренных при токе I_1 , до и после приложения импульса тока I_2 , можно оценить, происходит ли релаксация заряда при переключении токовых режимов. Затем, поддерживая ток постоянным на уровне I_1 , по изменению напряжения на МДП-структуре исследуется релаксация положительного заряда. Для изучения полевой зависимости релаксации зарядового состояния МДП-структуры после генерации одинаковой величины положительного заряда выдержка образца проводится при различной напряженности электрического поля, которой соответствуют различные амплитуды тока I_1 .

Возможно расширить вышеописанный метод, введя дополнительные ступени токовой нагрузки и контролируя изменение зарядового состояния непосредственно после инъекции требуемой величины заряда [8].

4. Выводы

Основным критерием, определяющим надежность и эксплуатационные параметры МДП-приборов, является зарядовая нестабильность подзатворного диэлектрика. МДП-транзисторы, выполненные по современным технологическим нормам, работают в режимах, близких к режимам инъекции носителей в диэлектрик. Соответственно, особый интерес с научной и практической точки зрения представляет изучение зарядовой деградации МДП-структур в сильных электрических полях, приводящих к инъекции

носителей заряда в диэлектрическую пленку. При этом становится важным контролировать процессы, происходящие в диэлектрике непосредственно в режиме сильнополевой инжекции заряда и сразу после нее, что невозможно реализовать традиционными методами, требующими перекоммутацию образца. Описан наиболее перспективный метод для решения поставленной задачи – метод исследования релаксации зарядового состояния МДП-структур в сильных электрических полях на основе метода управляемой токовой нагрузки, позволяющий контролировать релаксационные процессы в пленке диэлектрика без перекоммутации образца. Возможно использование данного метода в технологическом процессе производства МДП ИМС. Процессы релаксации зарядового состояния могут, как увеличить, так и уменьшить деградацию подзатворного диэлектрика в зависимости от условий, в которых они протекают, что дает возможность использовать данный метод для оперативной коррекции возникшей зарядовой нестабильности диэлектрика МДП-приборов.

5. Литература

1. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов: В 2-х кн. Кн.1/Пер. с англ. Под ред. Р.А.Сурица. М.: Мир, 1984. 456с.
2. URL.<http://www.techresearch.intel.com>
3. Procedure for the Wafer-Level Testing of Thin Dielectrics. JEDEC Standard JESD35-A. JEDEC Solid State technology Association, 2001. 47с.
4. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Loskutov S.A., Stolyarov A.A. The method of the MIS structure interface analysis // Surface and Interface Analysis. 1999. V.28. P.142-145.
5. Андреев В.В., Бедняков А.А., Новиков Л.С., Соловьев Г.Г., Столяров А.А., Лоскутов С.А. Сравнительное исследование зарядового состояния МДП-структур при облучении протонами и инжекции заряда в сильных электрических полях // ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2002. Вып.1-2. С.61-66.
6. Андреев В.В., Барышев В.Г., Столяров А.А. Инжекционные методы исследования и контроля структур металл-диэлектрик-полупроводник: Монография.// М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 256 с.
7. Исследование зарядовой деградации МДП-структур в сильных электрических полях методом управляемой токовой нагрузки/ В.В.Андреев, В.Г.Барышев, Г.Г.Бондаренко и др. // Микроэлектроника. 2000. Т.29. № 2. С.105-112.
8. Андреев В.В. Барышев В.Г., Бондаренко Г.Г., Столяров А.А. Метод многоуровневой токовой нагрузки для исследования генерации и релаксации положительного заряда в МДП-структурах// Микроэлектроника. 2003. Т.32. № 2. С.152-158.

Advanced charge stability control methods of MOS devices' gate dielectric

77-30569/332565

04, April 2012

Loskutov S.A., Drach V.E., Chuhraev I.V.

Bauman Moscow Technical University, Kaluga Branch

SergeL-75@ya.ru

drach@kaluga.org

igor.chukhraev@mail.ru

The authors analyze modern control methods of MOS-devices and charge stability of gate dielectric structures of metal-dielectric-semiconductor. Features of modern MOS-devices were defined subject to reduction of engineering rates. It was shown that the most perspective method was the electrophysical one based on the method of controlled current load; it allowed to analyze fast relaxation processes in dielectric directly after stresses.

Publications with keywords: [control](#), [defect](#), [integrated circuit](#), [dielectric films](#)

Publications with words: [control](#), [defect](#), [integrated circuit](#), [dielectric films](#)

References

1. Sze S.M. Physics of Semiconductor Devices. New York, Wiley, 1981. (Russ. Ed.: Zi S.M. Fizika poluprovodnikovyykh priborov: in 2 vols. Vol.1. Moscow, Mir, 1984. 456 p.).
2. <http://www.techresearch.intel.com>.
3. *Procedure for the Wafer-Level Testing of Thin Dielectrics. JEDEC Standard JESD35-A.* JEDEC Solid State technology Association, 2001. 47p.
4. Bondarenko G.G., Andreev V.V., Loskutov S.A., Stolyarov A.A. The method of the MIS structure interface analysis. *Surface and Interface Analysis*, 1999, vol. 28, pp.142-145.
5. Andreev V.V., Bedniakov A.A., Novikov L.S., Solov'ev G.G., Stolyarov A.A., Loskutov S.A. Sravnitel'noe issledovanie zariadovogo sostoianiia MDP-struktur pri obluchenii protonami i inzhektionsii zariada v sil'nykh elektricheskikh poliyakh [A comparative study of the charge state of the MIS structures under proton irradiation and the injection of of charge in strong electric fields]. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki (VANT). Ser.: Fizika radiatsionnogo vozdeistviia na radioelektronnuuu apparaturu* [Issues of atomic science and technology. Ser.: Physics of radiation effects on electronic equipment], 2002, iss. 1-2, pp.61-66.

6. Andreev V.V., Baryshev V.G., Stoliarov A.A. *Inzheksionnye metody issledovaniia i kontroliia struktur metall-dielektrik-poluprovodnik* [Injection methods of research and control of structures of metal-dielectric-semiconductor]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2004. 256 p.
7. Andreev V.V., Baryshev V.G., Bondarenko G.G., et al. Issledovanie zariadovoi degradatsii MDP-struktur v sil'nykh elektricheskikh poliakh metodom upravliaemoi tokovoi nagruzki [Research of the charge degradation of MIS-structures in strong electric fields by the method of driven current loading]. *Mikroelektronika*, 2000, vol. 29, no. 2, pp.105-112.
8. Andreev V.V., Baryshev V.G., Bondarenko G.G., Stoliarov A.A. Metod mnogourovnevoi tokovoi nagruzki dlia issledovaniia generatsii i relaksatsii polozhitel'nogo zariada v MDP-strukturakh [The method of multi-level current loading to study the generation and relaxation of the positive charge in MIS-structures]. *Mikroelektronika*, 2003, vol. 32, no. 2. pp.152-158.