

К. ф.-м. н. В. М. ПОПОВ, Ю. М. ШУСТОВ,
А. С. КЛИМЕНКО, А. П. ПОКАНЕВИЧ

Украина, г. Киев, Центр «Микроаналитика» НИИ микроприборов
E-mail: popovmc@i.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
23.04 2009 г.

Оппонент д. т. н. В. А. МОКРИЦКИЙ
(ОНПУ, г. Одесса)

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ КРЕМНИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ АРГОНА НА ОБРАЗОВАНИЕ В НЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ДЕФЕКТОВ

Показано, что травление кремния ионами с низкой энергией является эффективным средством целенаправленной модификации электрофизических свойств его поверхности.

Управление свойствами поверхности полупроводниковых материалов является одним из перспективных направлений совершенствования параметров приборов на их основе. В настоящее время существенное внимание уделяется изучению влияния низкоэнергетических ионов на свойства поверхности полупроводников. Облучение поверхности кремния ионами аргона используется в целях планаризации и получения атомарно чистой поверхности [1]. Понимание физических процессов, происходящих при взаимодействии ионов с поверхностью полупроводниковых структур, необходимо и при подготовке образцов для аналитических исследований методами просвечивающей электронной микроскопии [2]. Кроме того, при ионном распылении материалов возможно формирование специфического рельефа, в частности в результате явления самоорганизации на поверхности формируются квазипериодические, в том числе наноразмерные, структуры [3].

Большой интерес представляет возможность низкотемпературного формирования $p-n$ -переходов в кремнии путем его обработки в плазме, содержащей ионы аргона с низкой энергией [4].

Влияние облучения ионами аргона на ряд важных электрофизических свойств материала изучено недостаточно, в частности, отсутствуют сведения об образовании электрически активных дефектов (ЭАД) при взаимодействии ионных потоков с поверхностью кремния. Поскольку ЭАД ответственны за скорость протекания генерационно-рекомбинационных процессов в полупроводнике и существенно влияют на электрические параметры приборов, изучение их свойств является актуальной задачей. При этом особую ценность приобретают исследования, характеризующиеся высокой локальностью, при которых возможно изучение свойств отдельных дефектов. Это особенно важно в условиях постоянно растущей степени интеграции приборов микроэлектроники, при которой размеры дефектов и активных элементов интегральных схем становятся соизмеримыми, в результате чего свойства отдельных дефектов существенно

влияют на параметры и надежность изделий. В связи с этим для выявления и исследования ЭАД необходимо применение методов, характеризующихся высокой локальностью. К таким методам относится растровая электронная микроскопия (РЭМ) в режиме токов, индуцированных электронным лучом (ТИЭЛ) [5—7], а также лазерная сканирующая микроскопия, основанная на регистрации фототоков, наведенных в полупроводниковых структурах ($p-n$ -переходах, диодах Шоттки) сфокусированным лазерным зондом [8].

Целью работы являлось исследование влияния травления кремния p -типа низкоэнергетическими ионами аргона на электрофизические свойства материала, в том числе на образование ЭАД в приповерхностном слое полупроводника.

Образцы и методика эксперимента

Исследованы полированные пластины исходного монокристаллического кремния p -типа КДБ-10 с удельным сопротивлением 10 Ом·см диаметром 100 мм, используемые при изготовлении интегральных схем. Пластины кремния разрезались на части, после чего через металлическую маску проводилось травление их поверхности ионами аргона с энергией 3—6 кэВ на определенную глубину на установке FAV 306B (Ion Tech Ltd.), применяемой при подготовке образцов для исследования методом просвечивающей электронной микроскопии. Величина ионного тока составляла 50 мкА, средняя скорость травления — 2 Å в секунду, температура поверхности образца не превышала 100°C. Использовались маски с окнами размером от 0,5×0,5 до 3,0×3,0 мм.

Были подготовлены три группы образцов с глубиной травления 0,25, 0,65 и 1,0 мкм. На их поверхность через маску на установке катодного распыления IB-3 (Giko Engineering) осаждалась тонкая оптически полупрозрачная пленка золота толщиной 350—400 Å. Осаждение прямоугольных электродов осуществлялось таким образом, чтобы под одним электродом располагались как травленная, так и не травленная (исходная) поверхности кремния. Кроме того, некоторые электроды создавались только на травленных, а некоторые — только на исходных участках. В результате формировались диоды Шоттки (Au-Si). Для снижения обратного тока диодов пластины отжигались на воздухе при температуре 275°C в течение 30 минут.

Визуализация ЭАД в кремнии в диодах Шоттки проведена в РЭМ JSM IC845 (JEOL) в режиме ТИЭЛ. Использованы ускоряющее напряжение 15—25 кВ и ток электронного зонда $3 \cdot 10^{-10}$ — $1 \cdot 10^{-9}$ А. Локальность определения ЭАД составляла 3—5 мкм. Профилограммы токов, индуцированных электронным зондом в области отдельных дефектов, регистрировались электрометром В7-30 и записывались на самописце Н-307, синхронизированном со сканирующим лучом.

Примесный состав поверхности кремния контролировался методом локального рентгеноспектрального микроанализа на установке AN 10000/95S (Link Analytical), совмещенного с РЭМ.

Для регистрации фототоков в диодах Шоттки применялась система сканирования сфокусированным лазерным зондом (длина волны 0,63 мкм) мощностью 5 мВт, созданная на базе аналитической зондовой станции MM 7000 (Micromanipulator), оснащенной оптическим микроскопом высокого разрешения (увеличение до 2000 раз). Особенностью реализованной конструкции является совмещение лазерного луча с оптической системой микроскопа. В результате стала возможной фокусировка лазерного зонда до минимального диаметра 3 мкм при одновременном наблюдении за облучаемой областью образца при больших увеличениях. Сканирование лазерным зондом осуществлялось путем электрического перемещения держателя образцов либо прецизионным механическим перемещением оптической системы микроскопа.

С помощью микрозондовых манипуляторов исследуемые полупроводниковые структуры (диоды Шоттки) электрически соединялись с электрометром и высокоточным измерителем высокочастотных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) HP 4061A (Hewlett Packard).

Измерение глубины травления, микрошероховатости поверхности кремния, а также толщины электрода проводилось микропрофилетром Alpha Step 200 (Tencor Instruments) с чувствительностью по вертикали 5 Å.

Результаты и обсуждение

Исследование распределения величины ТИЭЛ по площади диодов Шоттки показало увеличение амплитуды тока в областях, подвергнутых ионному травлению, особенно на периферии (у краев маски), что, по-видимому, обусловлено усилением электрического поля и некоторой неравномерностью ионного травления здесь. В целом, в области ионного травления значения ТИЭЛ были в несколько раз больше, чем на необлученных участках. Так, например, на образце кремния с глубиной травления 0,65 мкм усиление ТИЭЛ без учета эффектов на периферии составляло 2—3 раза. На участках вблизи краев маски индуцированный ток возрастал более чем на порядок. Такое же усиление фототока у краев маски наблюдалось и при сканировании лазерным зондом. Аналогичным был и характер распределения фототока. Возрастание же фототока в области ионного травления вне периферийных участков было несколько выше и составляло 3—5 раз.

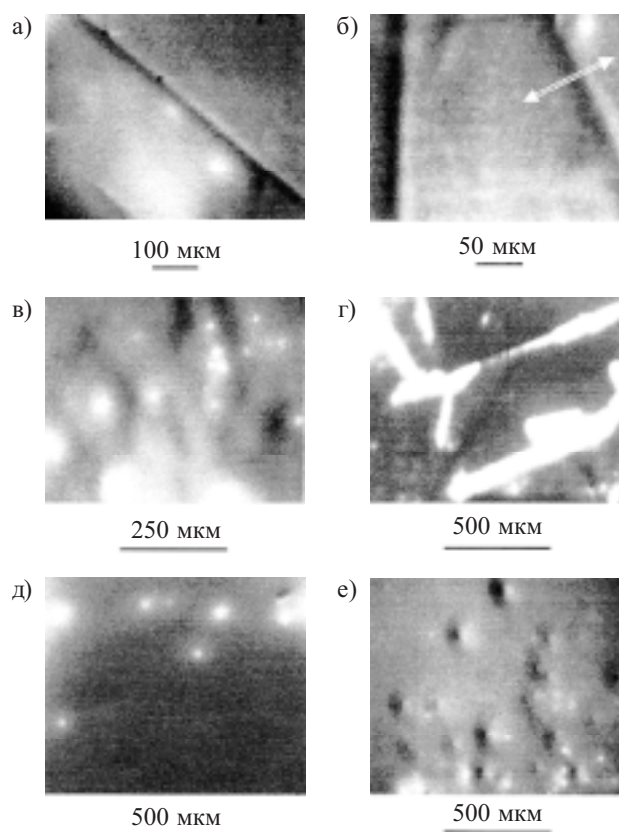


Рис. 1. Распределение электрически активных дефектов на поверхности кремния (диоды Шоттки Au-Si) после ионного травления на глубину 0,25 (а, б), 0,65 (в, г) и 1,0 мкм (д, е)

(Метод РЭМ в режиме ТИЭЛ. Ускоряющее напряжение электронного зонда 25 кВ. Область локального сканирования по отдельному ЭАД (б) показана стрелкой)

Детальный анализ области ионного травления с помощью РЭМ показал наличие локальных неоднородностей — ЭАД, в которых имело место существенное возрастание ТИЭЛ. Обнаружены дефекты линейного, точечного и протяженного вида (рис. 1), в то время как на исходном кремнии ЭАД практически отсутствовали.

На полученных изображениях локальное возрастание ТИЭЛ в области ЭАД имеет вид светлых участков на темном фоне либо участков, на которых наблюдается перепад яркости. Как показали исследования, светлые участки свойственны ЭАД с плавным профилем ТИЭЛ в области дефекта, а перепад яркости присущ линейным и точечным дефектам, профиль ТИЭЛ в которых имеет достаточно резкий максимум. В использованной электрической схеме формирования изображения в РЭМ такой характер сигнала приводит к его дифференцированию и регистрации перепада яркости в центральной части дефекта.

Установлено, что в отдельных ЭАД амплитуда ТИЭЛ по сравнению с бездефектной облученной областью возрастает не меньше чем на порядок.

Как видно из рис. 1, при малых значениях глубины ионного травления более типичными являются линейные дефекты поверхности кремния (а, б). Наиболее

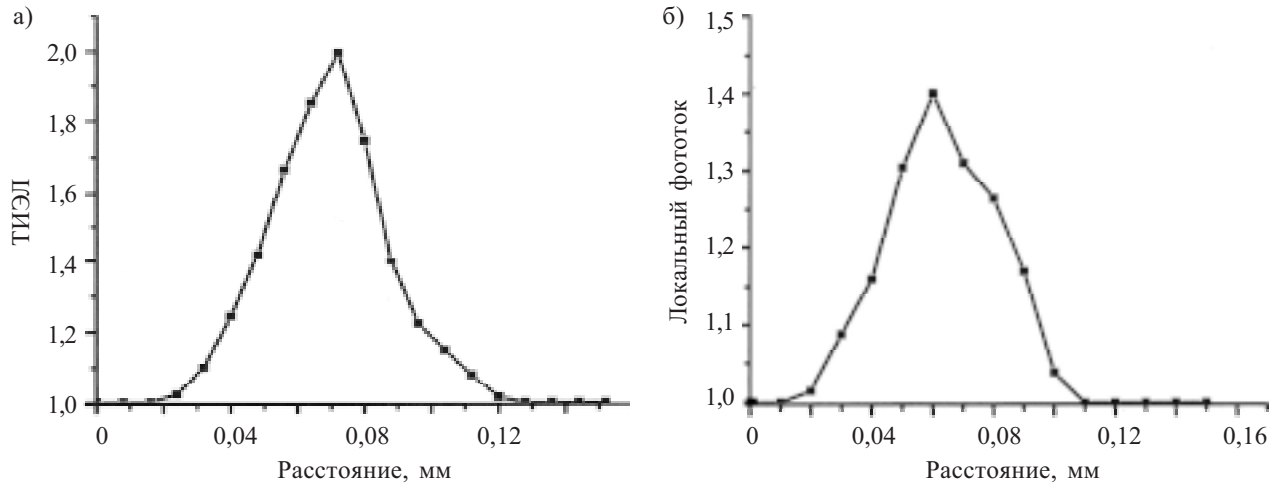


Рис. 2. Нормированные профили распределения ТИЭЛ (а) и локального фототока (б) в диоде Шоттки (Au-Si) в области линейного ЭАД, показанного на рис. 1, б (энергия электронного луча РЭМ составляла 25 кэВ)

крупные по площади участки усиления ТИЭЛ отмечены при глубине травления 0,65 мкм. В случае травления на глубину 1 мкм преобладающим типом ЭАД являются точечные и практически отсутствуют дефекты линейного вида, что, возможно, связано с удалением наиболее нарушенного слоя, расположенного непосредственно на поверхности пластин. Общая поверхностная концентрация дефектов снижается с увеличением глубины травления.

Полученные с помощью РЭМ данные о распределении дефектов на поверхности кремния полностью совпадают с результатами картографирования локальных фототоков.

В качестве примера на рис. 2 приведены профилограммы распределения ТИЭЛ и локального фототока при сканировании перпендикулярно линейному дефекту, показанному на рис. 1, б. Обе профилограммы, нормированные на величину тока вне области ЭАД, качественно одинаковы. Более сильная модуляция сигнала ТИЭЛ по сравнению с фототоком в дефекте объясняется более глубоким проникновением зоны возбуждения электронно-дырочных пар в полупроводник, происходящем при энергии электронного зонда 25 кэВ.

Следует отметить, что при возрастании энергии электронного зонда от 15 до 25 кэВ увеличения общей концентрации наблюдаемых дефектов не наблюдалось. Следовательно, ЭАД расположены, в основном, в приповерхностном слое кремния.

Наибольшее усиление локальных значений ТИЭЛ и величины фототока в отдельных ЭАД обнаружено при глубине травления 0,65 мкм. В некоторых ЭАД локальный фототок возрастал на один-два порядка по сравнению с бездефектной поверхностью. Такие свойства присущи, в частности, ЭАД, показанным на рис. 1 в, г.

В традиционных и хорошо изученных дефектах в кремнии, имеющих рекомбинационную природу, сигнал ТИЭЛ локально понижается [9]. Увеличение же наведенного тока в выявленных ЭАД указывает на иную природу найденных неоднородностей. Возра-

стание ТИЭЛ в ЭАД наблюдается достаточно редко и, в основном, связано с увеличением неравновесных электронно-дырочных пар в области локального усиления электрического поля в полупроводнике.

Для выяснения возможной природы найденных ЭАД были проведены исследования влияния ионного травления на профиль концентрации свободных носителей заряда p в приповерхностном слое кремния $p=f(x)$. С этой целью на диодах Шоттки, сформированных отдельно на исходной и на подвергнутой ионному воздействию поверхностях кремния, были измерены высокочастотные ВФХ и проведен расчет зависимостей $p=f(x)$. Установлено, что в результате ионного травления концентрация свободных дырок на поверхности кремния понижается (рис. 3). Так, профиль распределения концентрации дырок на исходной поверхности был постоянен, ее значение составляло $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ и соответствовало удельному сопротивлению использованного кремния КДБ-10. После удаления слоя кремния толщиной 0,65 мкм концентрация дырок плавно уменьшалась по направлению к поверхности, приближаясь к величине $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Снижение концентрации свободных носителей заряда на ионно-травленной поверхности подтверждено возрастанием поверхностного сопротивления кремния, измеренного четырехзондовым методом. На приведенных графиках расстояние от поверхности ($x=0$) до

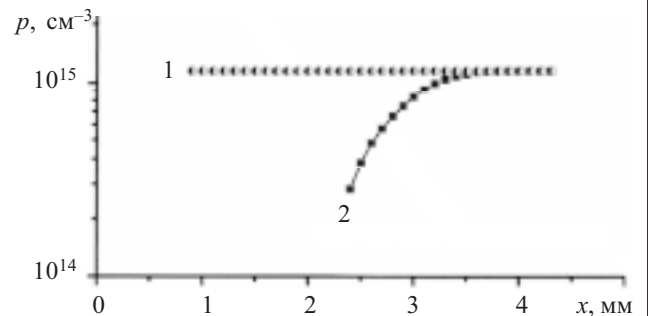


Рис. 3. Профили концентрации свободных носителей заряда в приповерхностном слое кремния p -типа до (1) и после (2) травления ионами аргона

точки начала расчета концентрации свободных носителей отражает равновесную глубину области пространственного заряда (ОПЗ) в кремнии. Из концентрационных профилей ясно, что глубина равновесной ОПЗ под электродом диодов Шоттки после ионного травления возрастает в 2,5 раза. При более глубоком ионном травлении наблюдается еще большее расширение слоя ОПЗ. В результате зона возбуждения неравновесных носителей заряда, генерируемых световым или электронным зондом, полностью располагается в слое ОПЗ под электродом, в котором отсутствуют рекомбинационные потери. Как следствие, ТИЭЛ и фототок, формируемые в цепи диода, не испытывают рекомбинационных потерь и увеличиваются. Более значительное усиление индуцированных токов в области ЭАД обусловлено электрофизическими особенностями этих дефектов, что подлежит дальнейшему изучению. Выяснение структурно-примесных свойств кремния в ЭАД и их воспроизведение технологическими методами на определенных участках поверхности полупроводника позволит создать условия для значительного повышения фоточувствительности диодов Шоттки в этих областях.

Можно предположить, что в ЭАД локальная концентрация свободных носителей заряда после травления еще ниже и приближается к собственной концентрации носителей заряда в полупроводнике, т. е. образует *i*-слой, в котором возможно увеличение неравновесных носителей заряда.

Одной из причин снижения концентрации дырок на поверхности кремния *p*-типа после ионного травления может являться поток быстро диффундирующих междоузельных атомов кремния, образовавшихся в результате взаимодействия ионов аргона с поверхностью образца. Согласно [4], междоузельные атомы, диффундируя в глубь полупроводника и замещая часть атомов бора, расположенных в решетке (механизм «kick-out»), переводят их в электрически неактивное состояние. Как следствие, падение концентрации свободных дырок максимально на поверхности и постепенно снижается по мере удаления в глубь полупроводника (от границы взаимодействия ионов аргона с кремнием).

Для оценки возможного влияния примесного фактора на изменение концентрации свободных носителей заряда после ионного травления был проведен локальный рентгеноспектральный микроанализ элементного состава на участках кремния после травления. В пределах чувствительности метода (0,2%) следов примесей, обусловленных материалами маски и элементов конструкции ионного источника, обнаружено не было.

Необходимо отметить, что использованные режимы ионного травления характеризовались достаточным равномерным удалением слоя материала. Так, ме-

тодом микропрофилометрии определено, что при длине сканирования 200 мкм во всем изученном диапазоне глубины травления микрошероховатость поверхности в среднем составляла 20—50 Å, мало отличаясь от значений данного параметра на исходной полированной поверхности (15—30 Å). Эти данные получены при диаметре закругления острия микрозонда порядка 1 мкм и позволяют оценить только те неоднородности, минимальные линейные размеры которых по линии сканирования составляют десятые доли микрона. Более точные исследования рельефа поверхности требуют применения методов атомной силовой микроскопии.

Данные, полученные в работе, свидетельствуют о возможности целенаправленного изменения концентрации свободных носителей заряда на поверхности кремния *p*-типа путем прецизионного травления низкоэнергетическими ионами аргона. Возрастание фоточувствительности диодов Шоттки на ионно-травленной поверхности кремния позволяет рассматривать данный метод как один из возможных путей совершенствования оптоэлектронных свойств кремния, являющегося базовым материалом микроэлектроники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Kim J. C., Ji J.-Y., Kline J. R., Tucker J. R., Shen T.-C. Preparation of atomically clean and flat Si (100) surfaces by low-energy ion sputtering and low-temperature annealing // *Applied Surface Science*.— 2003.— Vol. 220.— P. 293—297.
2. Берг Н. А., Сошников И. П. Распыление полупроводниковых мишеней $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ Ar^+ ионами с энергией 2—14 кэВ // *ЖТФ*.— 1997.— Т. 67.— С. 113—117.
3. Valbusa U., Boragno C., Buatier de Mongeot F. Nanostructuring surfaces by ion sputtering // *J. Phys.: Condens. Matter*.— 2002.— Vol. 14.— P. 8153—8175.
4. Buzynin A. N., Luk'yanov A. E., Osiko V. V., Voronkov V. V. Non-equilibrium impurity redistribution in Si // *Nucl. Instr. and Methods in Phys. Res. B*.— 2002.— Vol. B 186.— P. 366—370.
5. Практическая растровая электронная микроскопия / Под ред. Д. Гоулдстейна и Х. Яковица.— М.: Мир, 1977.
6. Денисюк В. А., Попов В. М. Локализация рекомбинационно-активных приповерхностных дефектов в полупроводнике МДП-структур при помощи растрового электронного микроскопа // *Радиотехника и электроника*.— 1982.— Т. 27.— № 7.— С. 1443—1445.
7. Popov V. M., Klimenko A. S., Pokanevich A. P. Investigation of electrically active defects in Si-based semiconductor structures // *Material Science and Engineering B*.— 2002.— Vol. B 91—92.— P. 248—252.
8. Martinuzia S., Palaisa O., Ostapenko S. Scanning techniques applied to the characterization of P and N type multicrystalline silicon // *Materials Science in Semiconductor Processing*.— 2006.— Vol. 9.— P. 230—235.
9. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии.— М.: Мир, 1984.