

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ИМПУЛЬСАМИ НАНОСЕКУНДНОЙ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА КРЕМНИЯ

В.А. Пилипенко, Д.В. Вечер, В.А. Горушко, В.С. Сякерский, Т.В. Петлицкая
НПО «Интеграл», 220108, Минск, ул. Корженевского, 12
Тел. 2123741, e-mail: office@bms.by

Изложены результаты использования лазерного излучения наносекундной длительности импульса в технологии создания сверхбольших интегральных схем. Показано, что в зависимости от режима обработки можно проводить как устранение механических нарушений кристаллической решетки кремния, так и создавать getterирующий слой, обеспечивающий очистку кремния от примесных загрязнений.

Введение

Одним из наиболее перспективных путей нагрева кремниевых структур в технологии субмикронных интегральных микросхем (ИМС) является импульсный, поскольку он значительно сокращает время термообработки, а, следовательно, уменьшает недостатки длительных высокотемпературных процессов. Его целесообразно проводить с помощью низкоэнергетических частиц, так как основным эффектом их взаимодействия с твердым телом является значительное тепловыделение в облучаемом образце, происходящее по механизму возбуждения и релаксации электронной подсистемы при облучении электронами или фотонами.

В настоящее время общепринятыми являются три наиболее важных случая нагрева кремниевых структур [1]:

- адиабатический режим (10^{-10} – 10^{-9} с) реализуется в диапазоне весьма коротких световых импульсов и характеризуется отсутствием перераспределения тепла из слоя, в котором поглощается излучение, в объем пластины;
- режим теплового потока (10^{-7} – 10^{-6} с), осуществляется в условиях, когда за время импульсной фотонной обработки область диффузионного перераспределения тепла становится больше толщины слоя, в котором происходит поглощение излучения, но не распространяется на всю толщину образца;
- режим теплового баланса (более 10^{-2} с) проявляется, когда тепловой фронт достигает необлучаемой стороны образца и выравнивает температурный профиль по толщине.

При быстрой термической обработке (БТО) кремниевых структур наиболее перспективным представляется адиабатический режим, поскольку в этом случае можно проводить плавление тонкого поверхностного слоя без изменения температуры подложки. Это позволяет создавать пересыщенные растворы, удалять пленки различных материалов, очищать поверхностные слои от примесных загрязнений, а также открывает другие возможности применения данного режима в технологии создания сверхбольших интегральных схем. Данный режим обработки реализуется на основе применения различных лазеров, дающих излучение с длительностью импульса от 10^{-8} до $6 \cdot 10^{-7}$ с. Поскольку кремниевая структура перед БТО представляет собой пластину на поверхности которой находятся области как чистого крем-

ния, так и с диэлектриком, а в случае создания токопроводящих слоев – металлом, то при проведении ее облучения наблюдается разный механизм поглощения фотонов данными областями, что приводит к возникновению градиентов температуры по площади пластины и как следствие возникновению дефектов в кремнии и деградации структуры ИМС.

Основная часть

При БТО кремниевых структур в адиабатическом режиме, когда используется монохроматическое и когерентное излучение лазеров, имеет место зависимость коэффициента отражения излучения от его длины волны и толщины диэлектрика на кремнии [2].

Проведенный расчет, показал, что для длины волны 1.06 мкм (излучение АИГ:Nd⁺-лазера) и толщины двуокиси кремния, кратной ее половине, коэффициент отражения достигает 30%. При толщине двуокиси кремния кратной четверти длины волны, коэффициент отражения от диэлектрика резко уменьшается и составляет менее 1% т. е. вся падающая энергия поглощается кремнием. При достижении порога плавления кремния энергии может оказаться достаточно для его эрозии под окислом. Это будет в большей степени сказываться в области клина на краю окна в окисле, разнотолщинность которого приводит к различному поглощению лазерного излучения и как следствие к эрозии поверхности кремния, либо увеличению глубины залегания *p-n*-перехода под клином. Это означает, что для обеспечения равномерного поглощения излучения по всей площади пластины последняя должна представлять собой оптически однородную поверхность.

В зависимости от длительности лазерного импульса такую обработку кремниевых структур можно использовать как для очистки поверхностного слоя рабочей стороны пластины от примесных загрязнений (10–30 нс), так и для создания getterирующего слоя (100–150 нс).

При длительности лазерного импульса 10–30 нс, когда локальное плавление поверхностного слоя кремния может достигать глубины до 1 мкм., из-за возникновения высокого градиента температур на границе двух фаз жидкий – кристаллический кремний в нем могут возникать термические напряжения. Исследования пластин, обработанных лазерным потоком с плотностью энер-

гии от 1.0 до 3.5 Дж/см² методом фотоупругости показали, что во всем диапазоне плотностей энергии возникновения термических напряжений и структурных дефектов не наблюдается. Данный факт, по-видимому, связан с тем, что за время воздействия лазерного излучения процесс пластического течения кремния не успевает произойти, а термические напряжения носят чисто упругий характер и не сохраняются после окончания обработки. В то же время механические напряжения, действующие в пластине после такой обработки, уменьшаются, на что указывает изменение ее прогиба. Это подтверждается тем, что при облучении рабочей стороны пластины, имеющей первоначально отрицательный изгиб, он увеличивается, а в случае положительного – уменьшается. Такое поведение может быть обусловлено только устранением нарушенного слоя с рабочей стороны пластины в процессе его плавления и последующей рекристаллизации.

Для подтверждения данного предположения проводились электронно-микроскопические исследования рабочей поверхности кремниевых пластин после ее обработки лазерным излучением с плотностью энергии 2.5 Дж/см² и длительностью импульса 25 нс ($\lambda = 1.06$ мкм). Было установлено, что такая обработка приводит к значительным изменениям в морфологии поверхности. Ее микрорельеф становится гладким практически без микронеровностей. На электронограммах видны непрерывные вертикальные стержни, являющиеся результатом двумерной дифракции от поверхностных атомных слоев и характеризующие атомарно-плоскую поверхность. Это говорит о том, что такая обработка приводит к формированию более совершенной кристаллической структуры поверхности кремниевых пластин. На это указывают и исследования влияния лазерной обработки на кристаллическую структуру поверхности кремниевых пластин с менее качественной ее подготовкой (полировка алмазными суспензиями с размером зерен 1–3 мкм). Поверхность таких пластин имеет плотную сеть рисков разной протяженности и различного направления, так называемый «алмазный фон» (рис. 1, а). При этом структура поверхностного слоя настолько искажена, что электронограмма «на отражение» имеет вид диффузного гало (рис. 1, в). После обработки «алмазный фон» исчезает (рис. 1, б) и на электронограмме появляются кикучи-линии (рис. 1, г). Это свидетельствует о том, что более глубокие слои имеют неискаженные, строго параллельные кристаллографические плоскости.

Данные результаты полностью подтверждаются исследованиями, проведенными методом кривых дифракционного отражения (КДО). Сравнение КДО от поверхности кремния до и после обработки лазерным излучением показало, что уширение основания КДО, характерное для нарушенного слоя, после такой обработки исчезает и кривая приближается к эталонной для идеальной поверхности.

Устранение нарушенного слоя на поверхности кремниевой пластины при лазерной обработке импульсами наносекундной длительности обеспечивается плавлением поверхностного слоя на

глубину, сопоставимую с длиной волны используемого излучения и толщиной нарушенного слоя, формируемого в процессе финишной химико-механической полировки кремниевых пластин.

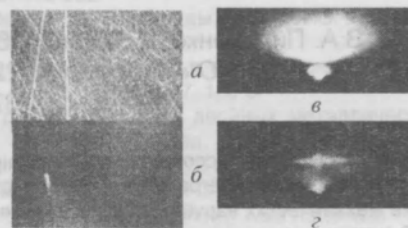


Рис. 1. Микрорельеф поверхности и картина дифракции от пластин кремния после механической полировки (а, в) и лазерной обработки импульсами наносекундной длительности (б, г).

Наличие нарушенного слоя на кремниевой пластине приводит к увеличению свободной поверхности, а следовательно, и поверхностной энергии пластины (потенциальная энергия атомов на границе кремниевая пластина-воздух вдвое выше, чем в объеме, поскольку атомы на границе окружены атомами кремния лишь со стороны объема). В области царапин полусферической формы создается капиллярное давление, которое стремится уменьшить величину свободной энергии и создать устойчивое равновесное положение с минимальной поверхностной энергией. С ростом температуры сила взаимодействия атомов в кристаллической решетке кремния уменьшается и в случае ее равенства величине капиллярного давления атомы кремния заполняют область царапины. Данный процесс протекает наиболее интенсивно при достижении температуры плавления кремния. Поскольку процесс рекристаллизации идет от кремния с совершенной кристаллической структурой, то в области механических нарушений происходит ее полное восстановление.

Фактором, способствующим кристаллизации нарушенного слоя, является резкое увеличение поглощения им лазерного излучения, что приводит к разогреву поверхностного слоя и образованию двух градиентов температуры. Первого на границе между расплавленным поверхностным слоем и холодной частью пластины, т. е. направленного нормально к поверхности пластины. Второго – в самом расплаве между областями с механическими нарушениями кристаллической решетки и без них и направленного параллельно поверхности. Это приводит к возникновению двух фронтов кристаллизации, способствующих заростанию областей с механическими повреждениями кристаллической решетки.

В результате протекания указанных процессов формируется поверхность с совершенной кристаллической решеткой.

При использовании лазерного излучения с длительностью импульса 100–150 нс, возможно создание геттерирующего слоя на нерабочей стороне пластины, который формируется за счет разрушения и испарения кремния в области воздействия. Это приводит к увеличению свободной

поверхности кремния и возникновению термических напряжений вокруг данной области за счет градиента температуры на границе раздела жидкий–кристаллический кремний. После длительной высокотемпературной обработки в области лазерного воздействия формируется дислокационная сетка, которая является стоком для быстродиффундирующих примесей и точечных дефектов в кремнии.

Для определения эффективности такого геттерирующего слоя были проведены эксперименты по декорированию центров геттерирования медью, которая осаждалась на рабочую сторону пластины, и осуществлялась ее термообработка при 800°C в течение 60 мин в атмосфере азота. После диффузии меди на нерабочей стороне селективным травлением выявляли ее преципитаты. Как показано на рисунке 2, в области лазерной обработки они распределялись неравномерно. По обе стороны от линии сканирования в полосах шириной 20–30 мкм преципитатов не наблюдалось. В центральной области между двумя соседними линиями сканирования их плотность увеличивалась до значений, соответствующих поверхности пластины, не подвергнутой лазерной обработке. Анализ косых шлифов, изготовленных на данных образцах и прошедших селективное травление, показал отсутствие преципитатов меди как по всей глубине нарушенного лазерным излучением слоя, так и при удалении от него в глубь пластины и в сторону до 30 мкм. Данные результаты свидетельствуют о том, что дефекты, сформированные импульсным лазерным излучением

на нерабочей стороне пластины, являются эффективными стоками для точечных дефектов и быстродиффундирующих примесей.

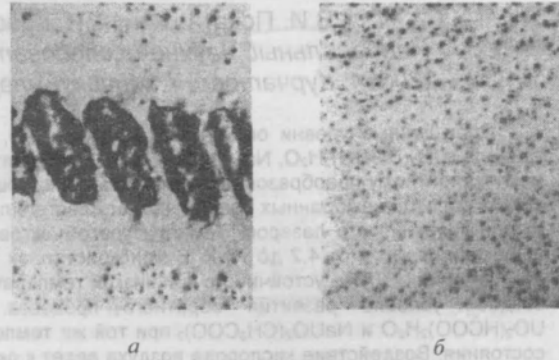


Рис. 2. Преципитаты меди с нерабочей стороны пластины в области воздействия импульсного лазерного излучения (а) и в ней (б) после лазерного геттерирования.

Заключение

Использование лазерного излучения с длительностью импульса 10–30 нс для обработки кремниевых пластин позволяет устранять механические нарушения их поверхностного слоя на глубину до 1 мкм. При длительности импульса 100–150 нс в кремнии образуются нарушения кристаллической решетки, являющиеся эффективными стоками для быстродиффундирующих примесей.

LASER IMPACT TREATMENT BY NANOSECOND DURATION PULSES ON SILICON SURFACE PROPERTIES

V.A. Piliipenko, D.V. Vecher, V.A. Gorushko, V.S. Syakersky, T.V. Petliitskaya
Research and Production Corporation "Integral" 12, Korzhenevskogo st., Minsk-220108
Phone: 2123741 E-mail: office@bms.by

Results are presented of the laser radiation application of the nanosecond pulse duration in the technology of creation of the super-large integrated circuits. It was shown, that in dependence on the mode of treatment it is possible both to perform elimination of the mechanical disorders of the silicon crystal lattice and to create the gettering layer, ensuring purification of silicon from the admixture impurities.