

В.А. ПИЛИПЕНКО, Д.В. ВЕЧЕР, В.В. ПОНАРЕДОВ, В.А. ГОРУШКО,
В.С. СЯКЕРСКИЙ, Т.В. ПЕТЛИЦКАЯ

ВЛИЯНИЕ ЛАЗЕРНОГО ГЕТТЕРИРОВАНИЯ НА СТРУКТУРНЫЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ

The effect of laser gettering process on the structural and electrophysical parameters of epitaxial films was analyzed. It was demonstrated that laser irradiation of the non-working surface of silicon wafers with a scanning pitch of 60 cm/scc prior to thermal oxidation at a temperature exceeding the temperature of a subsequent prolonged high-temperature treatment makes it possible to reduce the packing and dislocation defects density by a factor of $(2,2 \div 4,4)10^3$, to bring down the fill-up ratio with the glide lines of the epitaxial structures by a factor of 2,9, to realize a 12-times increase of the lifetime of minority charge carriers and recombination lifetime in silicon, and also to halve the density of the surface states at the interface of silicon-thermal silicon dioxide.

Основной причиной образования структурных дефектов в эпитаксиальных пленках является наличие в кремнии окислительных дефектов упаковки и кластеров точечных дефектов. Процесс зарождения и стабильность образующихся кластеров зависят от присутствия быстродиффундирующих примесей, время осаждения которых меньше, чем других дефектов. Нарушения на нерабочей стороне пластины приводят к диффузии примеси внедрения, междоузельных атомов и вакансий в поле упругих напряжений и поглощению их нарушенным слоем [1]. При использовании пластин со шлифованно-травленной нерабочей стороной, когда источник механических напряжений устраняется, резко возрастает роль процессов, приводящих к возникновению дефектов упаковки и дислокаций в момент эпитаксиального наращивания. Одним из методов предотвращения преципитации является создание электродвижущей силы экстракции быстродиффундирующих примесей за счет образования геттерирующего слоя с нерабочей стороны пластины при обработке ее непрерывным лазерным излучением.

Эффективность геттерирования зависит от его места в технологическом цикле изготовления сверхбольших интегральных схем. Для биполярных интегральных микросхем это первое окисление перед формированием эпитаксиальной пленки. При этом достигается максимальная эффективность геттерирующего слоя, так как окисление проводится при температуре $t = 1150^\circ\text{C}$ в течение 30 мин. Выбор места создания геттерирующего слоя в технологическом процессе обусловлен, во-первых, наличием достаточной температуры для релаксации термических напряжений с образованием дислокационной сетки и кислородных преципитатов и, во-вторых, отсутствием в технологическом процессе операций, для проведения которых необходимы более высокие температуры. В этом случае происходит резкая активация периферийных источников дислокаций и увеличение ползучести кремния, что обусловлено следующими причинами: напряжение в кремнии с увеличением температуры уменьшается линейно, а предел текучести - по экспоненте. Следовательно, незначительный рост температуры дальнейшей обработки над температурой окисления приведет к резкой активации дефектов.

Исследование влияния геттерирования на структурные и электрофизические параметры кремния проводилось путем их сравнительного анализа на пластинах с лазерным геттерированием и без него. Для уменьшения влияния факторов неоднородности между пластинами геттерирующий слой создавался только на половине пластины, затем сравнивались параметры этих областей (рис. 1). Плотность дефектов упаковки и дислокаций эпитаксиальных пленок, выращенных на таких пластинах, определялась после мел-

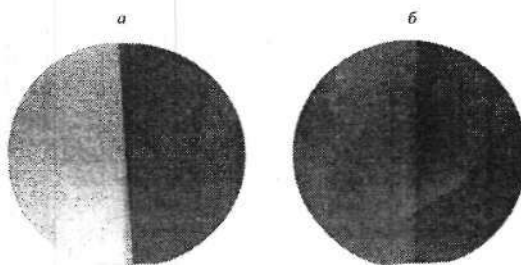


Рис. 1. Нерабочая (а) и рабочая (б) поверхности кремниевой пластины после геттерирования непрерывным лазерным излучением на половине пластины и последующего ее декорирования

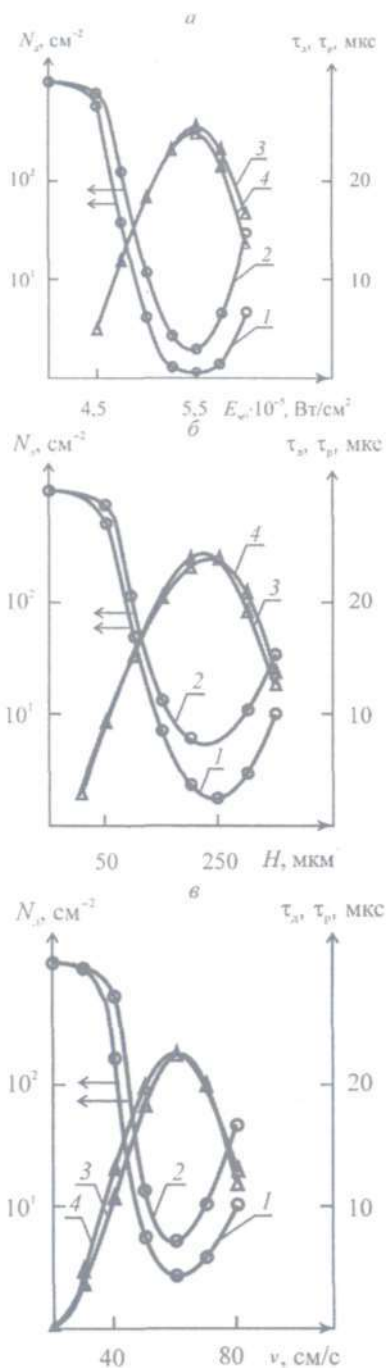


Рис. 2. Зависимости плотности дефектов упаковки (1), дислокаций (2), времени жизни неосновных носителей заряда (3) и рекомбинационного времени жизни (4) в кремниевых пластинах после геттерирования от плотности мощности непрерывного лазерного излучения (а), шага (б) и скорости (в) сканирования

кого селективного травления рабочей поверхности пластины, а для выявления линий скольжения использовалось глубокое селективное травление.

Исследования зависимостей плотности дефектов упаковки и дислокаций от режимов обработки непрерывным лазерным излучением позволили установить следующие закономерности (рис. 2). С увеличением мощности лазерного излучения ($E_{\text{л}}$) (рис. 2 а) наблюдается уменьшение плотности дефектов, что связано с ростом величины термических напряжений в области воздействия лазера [2]. Однако при достижении термических напряжений, достаточных для образования трещин в центре линии сканирования, плотность дефектов увеличивается. Это обусловлено тем, что при образовании трещины уменьшаются термические напряжения, значит, при последующей длительной высокотемпературной обработке происходит уменьшение плотности дислокаций в области воздействия непрерывного лазерного излучения, т. е. снижается эффективность геттерирования. При малых плотностях мощности лазерного излучения низкий эффект геттерирования может быть связан с отсутствием как смыкания температурных полей от соседних линий сканирования в районе температуры 1100°C , ниже которой напряжения носят упругий характер, так и плавления кремния, что приводит к уменьшению плотности дислокаций в геттерирующем слое, а также к уменьшению эффекта геттерирования.

Снижение плотности дефектов наблюдается также при увеличении шага сканирования H до $200 \mu\text{м}$ (рис. 2 б), что связано с уменьшением перекрытия напряженных областей от двух соседних линий лазерной обработки, поскольку в результате компенсации термических напряжений в данной области сетка дислокаций практически не образуется. В итоге растет плотность дислокационной сетки в геттерирующем слое, т. е. эффективность геттерирования. Увеличение плотности дефектов при

шаге сканирования более $250 \mu\text{м}$ связано с отсутствием смыкания напряженных областей от двух соседних линий сканирования, поэтому между линиями сканирования будет находиться область ненапряженного кремния, в которой при последующей длительной высокотемпературной обработке не образуется дислокационная сетка достаточной плотности для эффективного геттерирования (рис. 3).

Аналогично изменяется плотность дефектов с увеличением скорости сканирования v (рис. 2 в). Снижение плотности дефектов с ростом скорости сканирования до 60 см/с связано с уменьшением перекрытия напряженных областей от двух соседних линий сканирования за счет незначительного распространения тепла из места воздействия лазерного излучения в окружающий кремний.

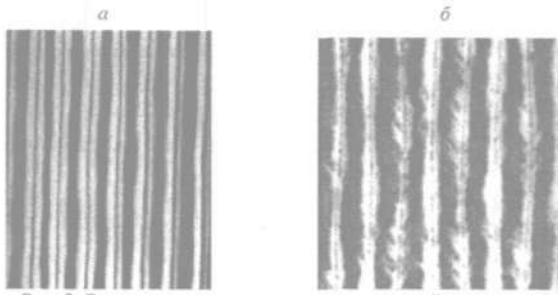


Рис. 3. Рентгеновская топограмма кремниевой пластины (а) после лазерной обработки ($H = 400$ мкм, $E_{\text{лб}} = 5,5 \cdot 10^5$ Вт/см² и $v = 60$ см/с) и (б) после последующей термической обработки в среде кислорода при $t = 1150$ °С

Увеличение плотности дефектов при скорости сканирования более 60 см/с обусловлено, во-первых, снижением времени воздействия непрерывного лазерного излучения до таких величин, когда не происходит смыкания напряженных областей от двух соседних линий сканирования, т. е. образуется ненапряженная область кремния. Во-вторых, при скорости сканирования выше 75 см/с плавление кремния идет неустойчиво, а следовательно, отсутствуют термические напряжения, достаточные для образования дислокаций во время последующих длительных высокотемпературных обработок.

Из приведенных данных следует, что режимом геттерирования, обеспечивающим минимальную плотность дефектов упаковки и дислокаций в эпитаксиальной пленке, выращенной на геттерированных пластинах, является следующий: $H = 250$ мкм, $E_{\text{лб}} = 5,5 \cdot 10^5$ Вт/см², $v = 60$ см/с. Использование такого режима перед первым окислением при $t = 1150$ °С в течение 30 мин позволяет снизить плотность дефектов упаковки в $4,4 \cdot 10^2$ раз и дислокаций $12,2 \cdot 10^2$ з, плотность которых на геттерированных пластинах составляла $1,1 \cdot 10^3$ и $1,3 \cdot 10^3$ соответственно.

Интересным результатом проведенных исследований явилось уменьшение в 2,9 раза коэффициента заполнения линиями скольжения, что, по-видимому, связано с тем, что дислокационная сетка, образованная в геттерирующем слое, препятствует развитию скольжения дислокаций, так как вызывает закрепление дислокаций в местах пересечения сетки, и, значит, тормозит движение дислокаций по плоскостям скольжения в глубь пластины.

Исследование времени жизни неосновных носителей заряда методом регистрации релаксации емкости структуры металл - диэлектрик - полупроводник (МДП) и рекомбинационного времени жизни методом затухания фотопроводимости показало (см. рис. 2), что изменение данных параметров в зависимости от режимов геттерирования противоположно изменению плотности дефектов упаковки и дислокаций. Величины этих параметров в области минимальной дефектности составляют 25 мкс, что в 12 раз выше, чем вне области геттера. Это свидетельствует о высокой эффективности геттерирования точечных дефектов и быстродиффундирующих примесей, уменьшающих время жизни неосновных носителей заряда и рекомбинационное время жизни.

Следует отметить, что на геттерированных пластинах плотность поверхностных состояний на границе раздела кремний - термическая двуокись кремния, определяемая путем записи высокочастотных вольт-фарадных характеристик МДП-системы, образованной в результате постановки индиевого зонда на поверхность окисла, в два раза меньше, чем на негеттерированных пластинах. Это обусловлено геттерированием быстродиффундирующих примесей от рабочей стороны пластины к нерабочей, что способствует меньшему загрязнению неконтролируемыми примесями растущего окисла, так как его рост при термическом окислении идет на 44 % за счет кремния.

Таким образом, геттерирование нерабочей стороны кремниевых пластин перед термическим окислением при температуре выше последующих длительных высо-

котемпературных процессов позволяет в $(2,2 \div 4,4)10^2$ раза снизить плотность дефектов упаковки и дислокаций, в 2,9 - коэффициент заполнения линиями скольжения, в 12 раз увеличить время жизни неосновных носителей заряда и рекомбинационное время жизни в кремнии, а также в 2 раза уменьшить плотность поверхностных состояний на границе раздела кремний - термическая двуокись кремния.

1. Дьячков А.М., Литвинов Ю.М., Петров С.В. и др. // Электронная промышленность. 2003. Вып. 3. С. 33.
2. Пилипенко В.А., Вечер Д.В., Горушко В.А. и др. // Докл. БГУИР. 2006. № 5.

Поступила в редакцию 25.01.07.

Владимир Александрович Пилипенко - член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор кафедры физики полупроводников и наноэлектроники.

Дмитрий Вячеславович Вечер - первый заместитель генерального директора Научно-производственного объединения «Интеграл».

Владимир Васильевич Понарядов - кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель проректора по научной работе, начальник НИЧ.

Валентина Алексеевна Горушко - ведущий инженер Государственного центра «Белмикроснстсмы» НПО «Интеграл».

Валентин Степанович Сякерский - директор НТЦ «Белмикроснстсмы» НПО «Интеграл».

Татьяна Владимировна Петлицкая - кандидат технических наук, ведущий инженер Государственного центра «Белмикроснстсмы» НТЦ «Белмикроснстсмы» НПО «Интеграл».