



ЛАЗЕРНАЯ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КРЕМНИЯ ПОСЛЕ ОПЕРАЦИИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

А. М. Григорьев, *grigoriev@lts.ru*, Центр лазерных технологий, *lts.ru*, Санкт-Петербург, Россия

Метод отжига полупроводниковой пластины после ионной имплантации, использующий нагрев пластины до температуры ниже температуры плавления материала, не обеспечивает восстановление структуры поверхностного слоя. Разработана установка для эффективной рекристаллизации нарушенного слоя поверхности кремниевой пластины после ионной имплантации для полупроводниковой индустрии (solution for front-end-of-line (FEOL) processing for the SEMI industry). Установка реализует технологию лазерного отжига поверхностного слоя толщиной 1 мкм кремниевых пластин диаметром до 200 мм и применяется в технологическом процессе изготовления высокоточных IGBT-транзисторов. В установке используется импульсный твердотельный Nd:YAG-лазер с преобразователем излучения во вторую гармонику.

Операция ионной имплантации позволяет создать на поверхности полупроводника тонкий слой материала с заданными свойствами. Изменение свойств обеспечивается внедрением примеси в приповерхностный слой полупроводниковой пластины и производится путем бомбардировки поверхности пластины ускоренными ионами. Бомбардировка кристаллической решетки приводит к нарушению поверхностного слоя материала пластины, а внедренные ионы примеси не имеют химической связи с атомами решетки. Для восстановления решетки и активации примеси, а именно внедрения атомов примеси в узлы решетки, необходимо выполнить рекристаллизацию нарушенного слоя. Рекристаллизация производится путем плавления поверхностного слоя полупроводника толщиной равной глубине залегания ионов примеси импульсным лазерным излучением с последующим быстрым охлаждением и кристаллизацией расплавленного слоя. В этих условиях реализуется процесс эпитаксии, при котором кристаллографическая ориентация кристаллизирующегося слоя повторяет кристаллографическую ориентацию подложки. Следует отметить, что стандартный метод отжига полупроводниковой пластины, который заключается в нагреве пластины до температуры меньшей, чем температура плавления полупроводникового материала пластины, и выдержке при этой температуре, не обеспечивает восстановление структуры поверхностного слоя и не приводит к активации примеси [1]. Поэтому лазерная рекристаллизация (отжиг) поверхностного слоя пластины после операции ионной имплантации имеет явные преимущества по сравнению с термическим отжигом.

Задача рекристаллизации поверхности кремниевой пластины многопараметрична и в совокупности условий для достижения требуемых параметров –

нетривиальна. Скорость лазерного нагрева поверхности полупроводника и глубина проплавления зависят от длительности и энергии лазерного импульса. Короткий лазерный импульс с длительностью порядка десяти наносекунд и энергией, достаточной для плавления слоя материала на глубину залегания примеси, обуславливает быстрый нагрев поверхности полупроводника до температуры кипения, что приводит к деструкции материала поверхности пластины. Слишком длинный лазерный импульс прогревает и плавит толстый слой материала толщиной больше, чем глубина залегания примеси, что приводит к диффузии примеси вглубь материала. Как разрушение материала поверхности, так и диффузия примеси вглубь полупроводника недопустимы, поскольку это делает невозможной дальнейшую работу формируемой полупроводниковой структуры.

Кроме этого, в процессе лазерной рекристаллизации возникают значительные термомеханические напряжения, вызванные распределением интенсивности лазерного излучения в зоне рекристаллизации и локальным характером воздействия. Большие напряжения приводят к образованию трещин и нарушению целостности материала. Таким образом, качественная рекристаллизация с высокой степенью активации примеси обеспечивается только в условиях воздействия на материал импульса лазерного излучения, обладающего строго определенными пространственно-временными и энергетическими параметрами: длительность и форма импульса, импульсная энергия и распределение интенсивности лазерного излучения в зоне рекристаллизации.

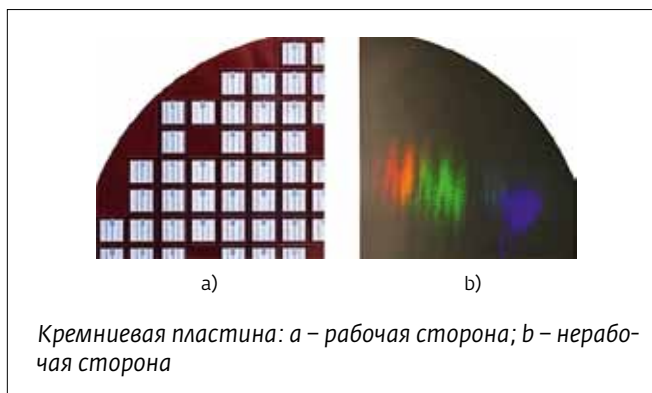
Эта технологическая задача успешно решена специалистами компании "Центр лазерных технологий" в результате отработки технологического про-

цесса лазерного отжига кремниевой пластины после имплантации ее поверхности ионами бора. Технологический процесс лазерного отжига разрабатывался применительно к созданию р-коллектора кремниевых JGBT-транзистора [2]. В процессе формирования структуры JGBT-транзистора используются обе стороны кремниевой пластины. Изображение сторон кремниевой пластины представлены на рисунке.

На лицевой (рабочей) стороне формируется основная часть структуры транзистора, а на обратной (нерабочей) стороне формируется р-коллектор методом ионной имплантации бора с последующей лазерной рекристаллизацией нарушенного слоя. Коллектор формируется в условиях, когда на рабочей стороне пластины уже есть основная структура транзистора. Поэтому рабочая сторона пластины в процессе отжига не должна нагреваться до температуры выше 4000 °С, что невозможно в условиях термического отжига в печи.

Специалисты лазерно-оптической лаборатории компании "Центр лазерных технологий" после проведения комплекса исследовательских и технологических работ создали технологию лазерного отжига поверхности кремниевых пластин, имплантированных ионами бора и других элементов, например фосфора. Было установлено, что структура отожженного слоя зависит от глубины проплавления. Если глубина проплавления была равна или превышала толщину разупорядоченного бомбардировкой слоя, лазерный отжиг восстанавливал монокристаллическую структуру. В случае, если граница расплава не достигала неповрежденной кристаллической решетки материала, структура отожженного слоя становилась поликристаллической.

Разработанная технология базируется на применении излучения хорошо известного и надежного импульсного твердотельного Nd:YAG лазера с преобразователем излучения во вторую гармонику. Лазер работает в режиме модуляции добротности резонатора электрооптическим затвором. Для обеспечения оптимальной длительности лазерного импульса применена специальная система управления скоростью включения затвора, что позволяет варьировать длительность импульса излучения в диапазоне от 25 до 300 нс. Оптимизация длительности воздействия позволила осуществить полную рекристаллизацию обратной поверхности кремниевой пластины, сохранив неизменными свойства структуры, сформированной на рабочей поверхности. В случае имплантации кремниевой пластины ионами бора с энергией порядка 100 кэВ полное восстановление нарушенного слоя обеспечивалось отжигом импульсами лазерного излучения с плотностью энергии



в диапазоне 1,5–2,5 Дж/см². В этих условиях толщина расплавленного слоя соответствует глубине залегания примеси и реализуется условие смачивания расплавом неповрежденной кристаллической решетки, что обеспечивает жидкофазную эпитаксиальную кристаллизацию и восстановление монокристаллической структуры имплантированного слоя с высокой степенью активации бора. Для минимизации термомеханических напряжений в зоне отжига разработана специальная оптическая система, которая формирует на поверхности отжигаемой пластины пятно прямоугольной формы с равномерным распределением интенсивности. В результате оптимизации пространственно-временных и энергетических параметров лазерного излучения удалось обеспечить качественный лазерный отжиг и получить IGBT транзистор, выдерживающий пробивные напряжения более 1000 В и рабочие токи в десятки ампер.

Компания «Центр лазерных технологий» создала оборудование промышленного применения для лазерной рекристаллизации поверхности полупроводниковых пластин. Экспериментальная установка лазерного отжига позволяет производить эффективную рекристаллизацию нарушенного слоя полупроводникового материала толщиной до 1 мкм и работать с пластинами диаметром 200 мм. Производительность экспериментальной установки лазерного отжига определяется частотой повторения импульсов лазерного излучения. Для лазера с частотой 100 Гц скорость отжига достигает 2 см²/сек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Двуреченский А.В., Качурин Г.А., Нидаев Е.В., Смирнов Л.С. Импульсный отжиг полупроводниковых материалов. – М.: Наука, 1982.
Dvurechenskiy A. V., Kachurin G. A., Nidayev E. V., Smirnov L. S. Impulsnyy otzhig poluprovodnikovykh materialov. – M.: Nauka. 1982.
2. Satoru Kaneko, Takeshi Ito, Kensuke Akiyama et al. Effect of CW Laser Annealing on Silicon Surface for Application of Power Device / Int. Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering, 2011, v.5, № 2.