

ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ ТАНДЕТРОН ПРИ СОЗДАНИИ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ С ПОВЫШЕННОЙ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТЬЮ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ

П. Б. Лагов¹⁾, А. С. Дренин¹⁾, М.А.Зиновьев¹⁾, Е.С.Роговский¹⁾

В. А. Романов²⁾, А. И. Глотов²⁾, У. А. Кобец²⁾, С. В. Бажал²⁾, Б. В. Куприянов²⁾

¹⁾НИТУ «МИСиС», ²⁾АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»

Рассмотрены возможности применения ускорителя ионов Тандетрон как технологического инструмента при создании полупроводниковых приборов различных типов на основе кремния и широкозонных материалов. Приведены краткие технические характеристики ускорителя. Представлены результаты улучшения электрических параметров различных кремниевых диодных структур и соответствующие режимы, выбранные с учетом двух и трехмерного моделирования взаимодействия ускоренных протонов с кристаллами диодов и последующего стабилизирующего отжига.

Одним из важнейших направлений повышения радиационной стойкости и улучшения комплекса электрических параметров полупроводниковых приборов является радиационная технология, которая включает облучение (электронное, альфа, гамма, протонное, ионное и др.) приборных структур на пластинах и последующий стабилизирующий отжиг при температурах 200–500 °С. Смещение атомов из узлов кристаллической решетки под воздействием облучения в сочетании с отжигом позволяет формировать термически стабильные центры рекомбинации (ЦР) в активных областях приборных структур, позволяющих в широком диапазоне регулировать значения электрофизических параметров полупроводникового материала и, соответственно, электрических параметров приборов [1–5]. Наибольшее практическое применение нашло облучение электронами кремниевых биполярных и биполярно-полевых приборов для повышения быстродействия путем увеличения скорости рассасывания неравновесных носителей заряда [6–8].

Основные отличительные черты и преимущества электронно-лучевой технологии модификации полупроводниковых приборов состоят в следующем: возможность обработки на воздухе, регулирование плотности потока электронов током пучка и расстоянием от выходного окна за счет рассеяния на воздухе, обеспечение большой площади обработки за счет работы в сканирующем режиме, широкие возможности по конструированию и изготовлению «подпучкового» оборудования, включая системы контроля пучка и держателей и систем подачи образцов, возможность обработки полупроводниковых пластин в несколько слоев за счет высокой проникающей способности ускоренных электронов (пробег в кремнии 1–2 см), возможность разогрева образцов пучком при необходимости, компактность и относительно невысокая стоимость оборудования и увеличения стоимости обрабатываемых изделий при резком повышении качества. Основным недостатком электронной обработки является однородное формирование ЦР по глубине структуры биполярного прибора, что приводит к нежелательному росту сопротивления в открытом состоянии.

Рекордные характеристики быстродействия диодов при требуемых значениях статических параметров и показателя мягкости переключения, что особенно важно для приборов силовой электроники при работе на индуктивную нагрузку, могут быть достигнуты только путем аксиального регулирования времени жизни неосновных носителей заряда по глубине структуры, которое может быть реализовано посредством обработки протонами или легкими ионами.

В настоящей работе приведены результаты предварительных экспериментов по регулированию параметров различных диодных структур, при производстве которых используются альтернативные методы регулирования быстродействия (облучение протонами на воздухе с большей начальной энергией, облучение электронами, альфа-частицами или легирование рекомбинационными примесями). Обработка структур протонами проведена в вакууме на ускорителе Тандетрон. Реализованные процессы сведены в таблицу.

Таблица – Технологические процессы протонной обработки диодных структур на ускорителе Тандетрон

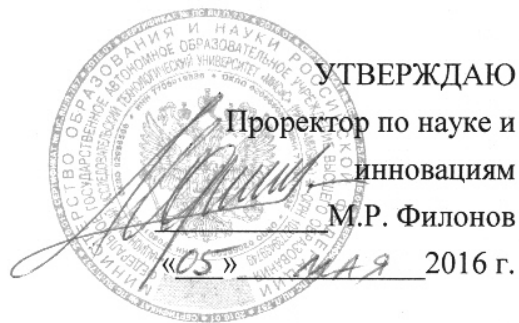
| Тип диодной структуры | Энергия протонов, МэВ | Флюенс, см ⁻² | Решаемая задача |
|--|-----------------------|--|--|
| Эпитаксиально-планарный импульсный диод (200 В, 3 А) | 0,7–1,2 | 10 ¹² –10 ¹³ | Снижение времени восстановления обратного сопротивления t_{tr} (≤ 10 нс) |
| Ультростабильный прецизионный стабилитрон (6,5 В; 7,5 мА) | 0,5–0,8 | 10 ¹³ –10 ¹⁴ | Снижение прямого падения напряжения на компенсирующем кристалле ($U_F < 0,55$ В) |
| Диффузионный сварочный диод (400 В; 600 В; 7,1 кА) | 2,8–3,5 | 5·10 ¹¹ –2·10 ¹² | Повышение рабочей частоты до 20 кГц, показателя мягкости переключения ($\geq 0,8$) |
| Быстровосстанавливающийся диод (1700, 2500, 3300 В; 100 А) | 0,8–1,0 | 10 ¹¹ –5·10 ¹² | Снижение t_{tr} (< 100 нс), увеличение показателя мягкости ($\geq 0,8$) |

Ускоритель Тандетрон в лучшую сторону отличается от аналогов низким энергопотреблением, возможностью плавной регулировки энергии (в диапазоне 0,2 до 6,6 МэВ для протонов) и зоны облучения, что делает его привлекательным для обработки партий полупроводниковых приборов на пластинах при обеспечении конкурентоспособной стоимости конечных изделий и улучшении комплекса электрических параметров. Кроме того, широкий спектр ускоряемых ионов позволяет использовать его для формирования активных областей дискретных приборов и микросхем на основе широкозонных полупроводниковых материалов путем имплантации легирующих примесей на глубину до нескольких микрометров.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект RFMEFI58415X0016).

Литература

1. Е.А.Ладыгин. Радиационная технология твердотельных электронных приборов. М.: ЦНИИ «Электроника», 1976. - 345 с.
2. Ладыгин Е.А., Лагов П.Б., Осипов Г.А. Улучшение усилительных, импульсных и температурных характеристик кремниевых маломощных транзисторов при обработке быстрыми электронами и отжиге. ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на РЭА. 1996. Вып. 1-3.
3. Ладыгин Е.А., Лагов П.Б. Преимущества высокотемпературного технологического облучения диодных матричных структур, применяемых в бортовой аппаратуре. ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на РЭА. 1999. Вып. 1-2.
4. Ладыгин Е.А., Лагов П.Б., Дашевский М.Я., Улимов В.Н., Сопов О.В. Физические основы радиационных процессов в технологии кремниевых приборов силовой электроники. V Семинар Азиатско-Тихоокеанской академии материалов «Материалы и процессы создания приборов силовой электроники». 5–7 мая 2001г., М., изд. ИИХ СО РАН. Новосибирск, 2001г.
5. Ладыгин Е.А., Паничкин А.В., Осипов Г.А., Таперо К.И., Лагов П.Б., Коновалов М.П. Физико-технические основы радиационных методов обработки полупроводниковых приборов и микросхем, используемых для комплектации электронных систем КА. Сборник трудов Международной Академии Информатизации, ФГУП «Опттекс», Москва, 2003г.
6. Павлов Ю.С., Лагов П.Б. Физико-технические основы и примеры применения радиационных методов обработки твердотельных электронных приборов. Труды XXV Международной конференции «Радиационная физика твёрдого тела» (Севастополь, Россия, 6 июля - 11 июля 2015 г.). М.: Изд-во ФГБНУ «НИИ ПМТ». 2015.
7. Павлов Ю.С., Ревина А.А., Кузнецов М.А., Суворова О.В., Сурма А.М., Лагов П.Б., Быковченко Т.В., Завьялов М.А., Филиппович В.П., Доброхотов В.В., Павлов В.А., Непомнящий О.Н. Промышленные электронно-лучевые технологии реализованные на ускорителе УЭЛВ-10-20-С-70-2. // VI Всероссийская конференция (с приглашением специалистов стран СНГ) "Актуальные проблемы химии высоких энергий" (Москва, 20-22 октября 2015 года). Материалы конференции. М., Издательство Граница". 2015.
8. Павлов Ю.С., Сурма А.М., Лагов П.Б., Фоменко Ю.Л., Гейфман Е.М. Электронно-лучевые технологии модификации биполярных полупроводниковых приборов на ускорителях. Материалы II конференции "Плазменные, лазерные исследования и технологии", секция «Ускорители заряженных частиц», 25-27 января 2016 г. НИЯУ «МИФИ».



УТВЕРЖДАЮ
Проректор по науке и
инновациям
М.Р. Филонов

«05» МАЯ 2016 г.

ЭКСПЕРТНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ О ВОЗМОЖНОСТИ ОПУБЛИКОВАНИЯ

Экспертная комиссия (руководитель-эксперт) НИТУ «МИСиС»
Министерство образования и науки РФ
(организация с указанием ведомственной принадлежности)

рассмотрев доклад на 19-ю Всероссийскую научно-техническую конференцию
«Стойкость – 2016» П. Б. Лагова, А. С. Дренина, М. А. Зиновьева, Е. С. Роговского, В.
А. Романова, А. И. Глотова, У. А. Кобец, С. В. Бажал, Б. В. Куприянова

«ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЯ ИОНОВ ТАНДЕТРОН ПРИ СОЗДАНИИ
ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ С ПОВЫШЕННОЙ
РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТЬЮ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ»

(ф.и.о. автора, вид и название материала)

подтверждает, что в материале не содержатся сведения, составляющие гостайну,
предусмотренные Перечнем Министерства образования и науки от РФ 2007 года
(содержатся ли сведения, составляющие гостайну)

На публикацию материала не следует
(следует ли)

получить разрешение Министерство образования и науки РФ
(министерства, ведомства или др. организации)

Заключение: представленный материал может быть опубликован в открытой печати.

Председатель комиссии (руководитель - эксперт)

(подпись)

проф. Делян В.И.
(фио, должность)