

## ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДОВ

Павлов Ю.С.<sup>1</sup>, Лагов П.Б.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН  
(119071, г. Москва, Ленинский проспект 31, корп. 4,

[E-mail: rad05@bk.ru](mailto:rad05@bk.ru))

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет  
«МИСиС» (119049, г. Москва, Ленинский проспект 4,

[E-mail: lagov2000@mail.ru](mailto:lagov2000@mail.ru))

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 [1–3]. Наибольшее практическое применение нашло облучение электронами кремниевых биполярных приборов для повышения быстродействия путем увеличения скорости рассасывания неравновесных носителей заряда [4–6].

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.

Для сравнения приведем основные недостатки альтернативных методов. Так легирование золотом приводит к негативному возрастанию обратных токов р-п переходов, имеет невысокую воспроизводимость концентрации от пластины к пластине и в пределах одной пластины. Легирование платиной позволяет минимизировать токи утечки, однако не позволяет достичь максимальных значений темпа рекомбинации и также характеризуется относительно невысокой воспроизводимостью. Источники альфа-частиц обеспечивают формирование дефектов на глубине не более 30 мкм, имеют небольшую площадь и интенсивность, что позволяет решать ограниченный спектр технологических задач при мелкосерийном производстве на пластинах малой площади. Широко используемый для разных задач источник гамма-излучения  $Co^{60}$  обеспечивает формирование смещение атомов в полупроводниках с передачей малых количеств энергии, и большинство сформированных в результате субнаноразмерных центров рекомбинации имеют относительно низкие температуры отжига, не оптимальное сочетание электрофизических параметров и обработка требует длительного времени. Обработка протонами требует очень дорогостоящего и энергоемкого оборудования, что ставит под сомнение экономическую эффективность данного инструмента на сегодняшний день, в связи со сложностью обеспечения высокой производительности процесса. Кроме того, при достижении высоких концентраций дефектов происходит легирование кристаллов водородом, что может приводить к различным временным и токовым нестабильностям приборов. Реальное технологическое применение на сегодняшний день имеет использование протонов с энергией 25 МэВ с выведением пучка на воздух, что обеспечивает относительно легкую и скоростную подачу образцов в зону обработки без использования вакуумных систем в полуавтоматическом режиме. Получаемая при этом дисперсия среднего нормального пробега протонов превышает 50 мкм, и хорошо подходит для локального формирования ЦР в протяженных высоковольтных диффузионных структурах силовых приборов, когда необходимо обеспечить мягкий процесс выключения [7].

В настоящей работе приведены оригинальные экспериментальные результаты по технологической обработке структур импульсных диодов (рис. 1) ускоренными электронами с энергией 8 МэВ для достижения значений времени восстановления обратного сопротивления на

уровне 5 нс. Диодные структуры изготовлены по эпитаксиально-планарной технологии с толщиной эпитаксиального слоя 25 мкм. Глубина залегания р-n перехода 6 мкм. После обработки структур был проведен стабилизирующий отжиг (350°C, 1 час). Значения основных параметров структур (время восстановления обратного сопротивления –  $t_{гр}$ , обратный ток при обратном напряжении 200 В –  $I_{обр}$ , прямое падение напряжения –  $U_{пр}$  при прямом токе 1 А) до и после обработки приведены в таблице. Для сравнения приведены результаты, получаемые при использовании термодиффузии золота в качестве метода формирования ЦР.

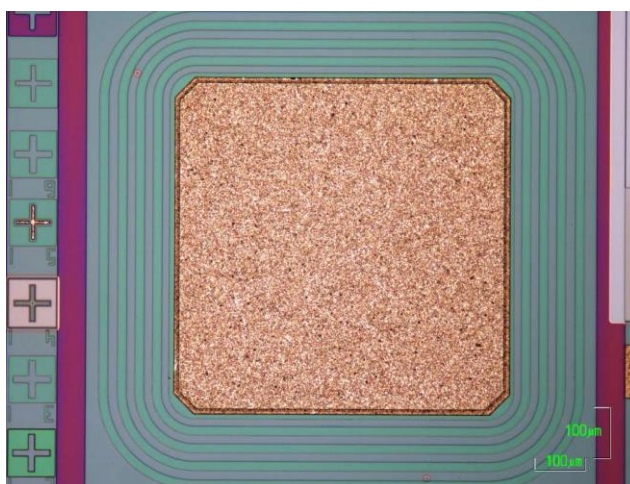


Рис.1. Фото кристалла импульсного диода

Таблица 1 –Параметры импульсных диодов при различных вариантах обработки

Параметр	Вариант обработки		
	исходные	электроны 8 МэВ	легирование Au
$t_{гр}$ , нс	> 500	6±2	15±5
$I_{обр}$ , мА	< 0,1	< 0,1	≥ 1
$U_{пр}$ , В	≤1,15	≤1,25	≤1,25

Таким образом, показано, что радиационная технология на основе ускоренных электронов может быть эффективно применена для изготовления импульсных диодов с наилучшим сочетанием электрических параметров, а именно высокое быстродействие в сочетании с невысокими обратными токами и прямыми потерями напряжения. Достижение такого комплекса характеристик обусловлено как правильно выбранными режимами обработки, так и конструктивно-технологическими особенностями исходной диодной структуры.

## Литература

1. Ладыгин Е.А., Лагов П.Б., Осипов Г.А. Улучшение усилительных, импульсных и температурных характеристик кремниевых мало-мощных транзисторов при обработке быстрыми электронами и отжиге. ВАНТ. Серия: Физика радиационного воздействия на РЭА. 1996. Вып. 1-3.
2. 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.
3. 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. ИНХ СО РАН. Новосибирск, 2001г.
4. 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.
5. 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.
6. Павлов Ю.С., Сурма А.М., Лагов П.Б., Фоменко Ю.Л., Гейфман Е.М. Электронно-лучевые технологии модификации биполярных полупроводниковых приборов на ускорителях. Сборник научных трудов II международной конференции "Плазменные, лазерные исследования и технологии", секция «Ускорители заряженных частиц», 25-27 января 2016 г. НИЯУ «МИФИ». С. 181.
7. Chernikov A.A., Gubarev V.N., Stavtsev A.V., Surma A.M., Vetrov I.Y. One more way to increase the recovery softness of fast highvoltage diodes. Proc. of the 14th European Conf. on Power Electronics and Application (EPE-2011), Aug 30, 2011 - Sep 1, 2011, Birmingham, UK.