

ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ МОЩНЫХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Н.Е.Жданович, И.Г.Марченко

*Институт физики твердого тела и полупроводников НАН Беларуси,
220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 17, troschin@ifttp.bas-net.by*

Обсуждаются способы прецизионной обработки электронным облучением силовых полупроводниковых приборов на основе кремния с целью повышения их быстродействия и снижения потерь при переключении. Проводится сравнительный анализ статических и динамических параметров диодов и тиристоров, облученных в различных режимах.

I. Введение

Силовая полупроводниковая электроника, являясь связующим звеном между производством и потреблением электроэнергии, оказывает большое влияние практически на все области техники. По оценкам специалистов оптимальное насыщение сегодняшней промышленности современной силовой электроникой позволило бы сэкономить не менее 10% потребляемой электроэнергии [1]. Значительным потенциальным источником ее экономии является использование в различных электротехнических устройствах силовых полупроводниковых приборов (СПП) с низкими коммутационными энергопотерями.

Одна из основных тенденций развития быстродействующих СПП (мощных диодов, транзисторов и тиристоров) связана с совершенствованием методов управления скоростью объемной рекомбинации (временем жизни) неравновесных носителей заряда (ННЗ) в полупроводниковых структурах силовых приборов.

Целью данной работы является исследование и разработка новых радиационно-технологических методов создания быстродействующих СПП диодного и тиристорного типов, имеющих оптимальную совокупность основных электрических характеристик и малые энергопотери при переключении.

II. Основная часть

При достижении поставленной цели использовалось электронное облучение с энергией 300 кэВ-6 МэВ для контролируемого изменения времени жизни ННЗ путем создания в базовых областях приборов пространственно-неоднородного распределения радиационных дефектов как центров рекомбинации (ЦР). Объектами исследования служили диодные (в дальнейшем именуемые р-п-) и тиристорные р-п-р-п- структуры, изготовленные по стандартной диффузионной технологии на основе Si двух типов: легированного фосфором в процессе выращивания методом Чохральского и легированного трансмутационным методом в ядерном реакторе. Использовался кремний с $\rho=30-40$ Ом·см и 200 Ом·см. Структуры имели следующие размеры слоев: п-база (диода или тиристора) 120-600 мкм, р-эмиттер 40-100 мкм, р-база 40-60 мкм. Площадь структур, оцененная по катодному электроду, составляла $> 0,2$ см². Используемые структуры являются основой коммерческих силовых диодов и тиристо-

ров, в том числе и запираемых по управляющему электроду.

Облучение образцов проводилось после операции формирования контактов (до посадки в корпуса) на линейных импульсных ускорителях электронов (длительность импульса 5 мкс, частота повторения импульсов 200 Гц). Для локализации электронного пучка по площади приборной структуры использовались алюминиевые или молибденовые экраны с определенной конфигурацией и размерами отверстий, а для получения профилей распределения ЦР по глубине структуры - набор защитных экранов, а также облучение приборов в электрически активном режиме. Термический отжиг облученных структур проводился при температурах 300-500°C.

Для получения информации о дефектах использовался метод нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS). Время жизни в п-базе измерялось по методу Лэкса в диодах [2] и разностным методом в тиристорах [3]. Контролировалось также время восстановления обратного сопротивления диодной структуры (t_{π}) и время выключения тиристорной (t_{α}). Из статических параметров измерялись: прямое падение напряжения на р-п-структуре, (U_{FAM}) остаточное напряжение на р-п-р-п-структуре в открытом состоянии (U_{TAM}), ток утечки (I_R).

В ходе выполнения данной работы последовательно выяснялись следующие вопросы.

1. Какие рекомбинационные центры, вводимые электронным облучением в Si, прошедший полный технологический цикл изготовления прибора (до посадки в корпус), по своим свойствам удовлетворяют физике процессов в СПП, с точки зрения эффективности улучшения их характеристик и надежности в процессе работы.

2. Какая кинетика накопления этих центров в зависимости от условий облучения и отжига.

3. Какой вид распределения ЦР по толще и площади приборной структуры, позволяет получить наиболее оптимальное соотношение динамических и статических параметров.

Мы рассмотрели три варианта распределения ЦР в базовой области диодов и широкой базе тиристоров.

Первый вариант: формирование профиля ЦР с максимумом концентрации вблизи эмиттерного р-п-перехода и спадом вглубь базы. Указанный профиль можно получить при облучении р-п-структуры электронами с энергией 350-600 кэВ со стороны эмиттерной области, а р-п-р-п- структуры



со стороны анода. Механизм его образования основан на известном физическом явлении, суть которого заключается в резком снижении скорости введения дефектов в Si, облученном электронами с энергией вблизи порога дефектообразования. Еще одна возможность получения такого типа распределения - это облучение приборов в электрически активном режиме: при обратном смещении и в режиме инжекции.

Второй вариант пространственно-неоднородного распределения ЦР в приборной структуре заключается в формировании зон повышенной рекомбинации (ЗПР) цилиндрической формы, распределенных по площади структуры равномерно или в определенном порядке. В процессе облучения (4МэВ) использовался экран толщиной, превышающей длину полного пробега электронов в материале экрана с отверстиями, расположение которых отвечало необходимой конфигурации ЗПР. При радиационной обработке тиристоров расположение ЗПР совпадало с конфигурацией электрода управления. При этом в р-р-р- тиристоре образуется область со структурой р-р-р и пониженным временем жизни HN3 . Известно, что в процессе выключения дырки, накопленные в п-базе тиристора при протекании прямого тока, выводятся диффузией, а электроны рассасываются в результате рекомбинации, скорость которой и определяет t_q , т.е. быстродействие прибора. При облучении всего образца увеличение скорости объемной рекомбинации в п-базе влечет за собой рост U_{FAM} . Создание ЗПР устраняет этот недостаток. В этом случае дырки в процессе выключения, как и прежде, удаляются диффузией, а электроны затягиваются электрическим полем в ЗПР, где темп рекомбинации высок. Процесс рассасывания носителей заряда ускоряется, а поскольку ЗПР занимает небольшую часть структуры, её влияние на U_{FAM} и I_R незначительно.

Поиск оптимального расположения и размера ЗПР для диодных структур осуществлялся эмпирически. Дело в том, что расчёт процесса рассасывания носителей при выключении диода в присутствии ЗПР является достаточно сложной задачей и не может быть решен в настоящий момент в рамках традиционных одномерных моделей. Было реализовано по меньшей мере 20 вариантов локального облучения. Площадь ЗПР варьировалась до 10 мм^2 , расстояние между зонами - до 5 мм. Для диодов, облучаемых через экраны с различной конфигурацией и размерами отверстий, t_q доводилось до одинаковой (требуемой) величины. Наименьшее значение U_{FAM} свидетельствовало об оптимальном расположении ЗПР. Наилучшие результаты (низкое U_{FAM} и малые I_R) для исследуемых диодов получены: когда прикрыта от облучения поверхностная фаска; когда ЗПР равномерно распределены по поверхности и имеют размеры $0,04 \text{ мм}^2$ и расстояние между ближайшими зонами 0,5мм.

Третий вариант - комбинированное облучение с использованием двух, приведенных выше способов облучения.

Рассмотрим отдельные экспериментальные данные, которые дают представление о характе-

ре изменения характеристик СПП при различных способах обработки.

На рис.1 представлены прямые ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) диодных структур, облученных различными способами. Кривая

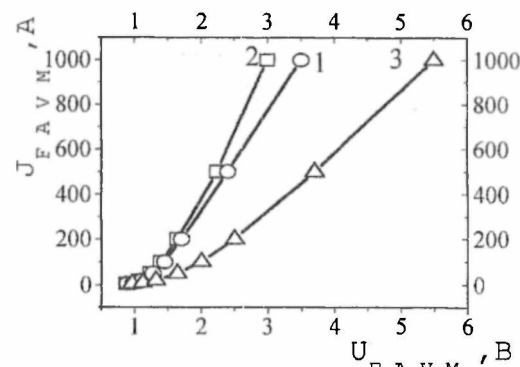


Рис. 1 ВАХ диодов, облученных в различных режимах

1 соответствует образцу, который в процессе облучения электронами с $E=4 \text{ МэВ}$ находился под обратным смещением 100 В при температуре 77К. Кр. 2 - через образец в процессе облучения гамма-квантами Co^{60} пропускся прямой ток плотностью 100 А.см^{-2} , а кривая 3 соответствует обычному облучению электронами с $E=4 \text{ МэВ}$. Быстродействие всех образцов было одинаковым. Видно, что при обычном облучении прямое падение напряжения более чем в полтора раза выше, а, следовательно, и потери мощности в открытом состоянии диода будут выше, что крайне нежелательно. Наблюдаемое различие в ходе ВАХ может быть обусловлено тем, что в случае облучения в активных режимах происходит неравномерное введение РД в слаболегированную базу диодов

На рис.2 показаны температурные зависимости прямого падения напряжения для диодных

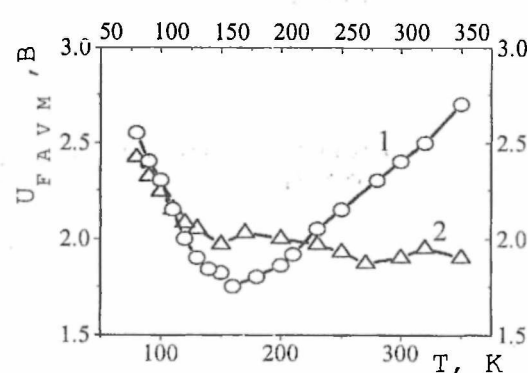


Рис.2 Температурные зависимости прямого падения напряжения на диодах

структур двух групп. Структуры первой группы были подвергнуты облучению электронами с $E=4 \text{ МэВ}$ при комнатной температуре, а структуры второй группы прошли радиационно-термическую обработку, заключающуюся в том, что структуры подвергнутые электронному облучению при комнатной температуре затем отжигались при температуре 450°C в течение 30 мин. Флюенсы об-

лучения в обоих случаях подбирались таким образом, чтобы выйти на одинаковый уровень быстрогодействия при комнатной температуре. Как видно, величина U_{FAVM} у образцов, прошедших высокотемпературную обработку имеет очень слабую зависимость от температуры, поэтому при использовании диодов на основе таких структур дрейф U_{FAVM} в широком интервале температур будет незначительным.

На рис.3 представлены зависимости паде-

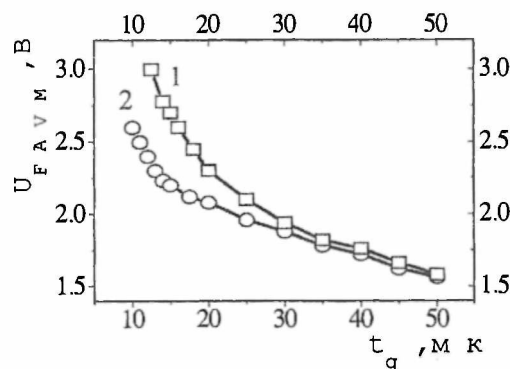


Рис.3. Зависимости остаточного напряжения U_{FAVM} на тиристорах, облученных различными способами от времени выключения t_q

ния напряжения в открытом состоянии тиристора от времени выключения. Кривая 1 соответствует облучению всей структуры, а кривая 2 - облучению локальной области тиристорной структуры под управляющим электродом и частью катодного электрода. Видно, что при одинаковой величине времени выключения тиристора, величина U_{FAVM} значительно ниже при локальном облучении.

В таблицах 1, 2, в качестве примера приведены основные параметры диодов на ток до 500А, (2000 В) и тиристоров на ток до 630 А (2000 В) для случаев равномерного и неравномерного распределения центров рекомбинации.

Табл.1 Сравнение характеристик диодов

I_{FAV} [А]	V_{RRM} [В.10 ⁻²]	t_{rr} , [мкс]	Q_{rr} , [мкКл]	U_{FAVM}/I_{FAVM} , [В/А]
Равномерно распределенные дефекты				
500	12-20	4	250	2.1/1570
Неравномерно распределенные дефекты				
500	12-20	2.5	150	2.0/1570

Табл. 2 Сравнение характеристик тиристоров

I_{TAV} , [А]	$V_{DRM/RRM}$, [В.10 ⁻²]	t_q , [мкс]	U_{TAVM}/I_{TAVM} , [В/А]
Равномерно распределенные дефекты			
630	12-20	20-25	3.6/1980
Неравномерно распределенные дефекты			
630	12-20	12.5-25	2.0/1980

III. Заключение

Таким образом, приведенные выше результаты показывают, что при регулировке параметров СПП с использованием излучений высоких энергий значительные преимущества имеют методы, позволяющие формировать пространственно - неоднородное распределение радиационных (рекомбинационных центров в приборной структуре. Применение для этих целей высокоэнергетических электронов позволяет получить диоды и тиристоры с уникальными электрическими характеристиками.

Работа выполнена при поддержке Республиканского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

1. Грехов И.В. // Петербургский журнал электроники, -1994 №1 С.37
2. Lax B, Newstadter S.T, // J. Appl. Phys. V. 25 1954 №3- С.1148.
3. Б.И.Григорьев, В.В.Тогатов, // Электронная техника, сер. 2, 1974 вып. 84 С. 75.

INVESTIGATION OF THE NEW METHODS OF THE MANUFACTURE OF THE POWER FAST SEMICONDUCTOR DEVICES WITH THE USAGE OF ELECTRON IRRADIATION

N.E.Jdanovitch, I.G.Marchenko

The Institute of solid state and semiconductors physics NAS of Belarus,
220072, Minsk, P. Brovka street., 17, troschin@ifftp.bas-net.by

Methods of the precise processing with the electron irradiation of power semiconductor silicon devices are considered concerning the increase of their speed and the decrease of their switching losses. It is shown that usage of different methods of selective irradiation and irradiation in electrically active modes (under the reverse bias and in the conducting state) allows to obtain fast power diodes and thyristors with the best static and dynamic parameters. The comparative analysis of the static and dynamic parameters of diodes and thyristors irradiated in different modes are submitted.