

Технологическая линейка для модифицирования полупроводников и коррекции характеристик полупроводниковых приборов методами имплантации ионов высоких энергий на УНУ «Циклотрон ФТИ»

*Владимир Алексеевич Козлов^{1,2}
Михаил Федорович Кудояров²
Владимир Михайлович Ефанов¹*

¹АО «ПК «ФИД-Техника», 194223, г. Санкт-Петербург, пр. Тореза., д. 68
²ФТИ им. А.Ф.Иоффе, 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26
kozlov@fidtech.com

Аннотация - В работе рассмотрены возможности технологии модифицирования полупроводников (Si, GaAs, SiC) и коррекции характеристик полупроводниковых приборов с использованием методов имплантации ионов высоких энергий. Обсуждаются особенности построения технологической линейки и оборудования для выполнения процессов обработки пластин большого диаметра на базе циклотрона ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Ключевые слова - модифицирование полупроводников, радиационные технологии , имплантация ионов высоких энергий, циклотрон, радиационные дефекты, статические и динамические характеристики полупроводниковых приборов.

The technological line for modification of semiconductors and correction of semiconductor device characteristics via high energy ion implantation at the cyclotron of the Ioffe Institute.

Vladimir Alekseevich Kozlov^{1,2}
Mikhail Fedorovich Kudoyarov²
Vladimir Mikhailovich Efanov¹
¹PK "FID-Tekhnika", 194223, Saint-Petersburg, Toreza st., 68
²Ioffe Institute, 194021, Saint-Petersburg, Politekhnikeskaya st., 26
kozlov@fidtech.com

Abstract - The main possible application of the technology for semiconductor material modification and correction of semiconductor device characteristics via high energy ion implantation are considered in the paper. Features of the technological line and equipment for treatment of large diameter wafers are discussed on example of the Ioffe Institute cyclotron application.

Keywords - modification of semiconductors, radiation assisted technology, high energy ion implantation, cyclotron, radiation induced defects, static and dynamic characteristics of semiconductor devices.

Введение.

Одними из важнейших методов целенаправленного изменения свойств полупроводниковых материалов и коррекции характеристик полупроводниковых приборов являются методы радиационной обработки полупроводников и имплантации ионов различных масс и энергий. Данные методы основаны на создании в полупроводниковом кристалле комплексов дефектов кристаллической структуры или химического состава при его облучении частицами высоких энергий (гамма-квантами, электронами, нейтронами и т. п.) или путем облучения ионами химических элементов. Наибольшее развитие и практическое применение в технологии производства современных полупроводниковых приборных структур получили методы имплантации в кристаллы полупроводника донорных или акцепторных примесей для целенаправленного изменения типа проводимости и удельного сопротивления в полупроводниковых приборных слоях, а также методы уменьшения времени жизни неосновных носителей заряда в приборных структурах путем введения радиационных дефектов в кристаллы при их облучении электронами. Для проведения технологических процессов имплантации легирующих примесей в полупроводники разработаны и широко представлены на рынке комплексы соответствующего оборудования, в которых энергия ионов при ионной имплантации обычно не превышает уровня 100 кэВ (в некоторых модификациях «имплантеров» энергия ионов достигает значений 500 кэВ). Для облучения полупроводников электронами как правило применяются линейные электронные ускорители с энергиями электронов в пучке в пределах от 1 до 10 МэВ.

Наряду с указанными выше радиационно-технологическими процессами и оборудованием для обработки полупроводников ионами сравнительно малых энергий развивались и технологические процессы с применением имплантации в полупроводники ионов высоких энергий. За последние три-четыре десятилетия эти технологии «доросли» до серийного промышленного применения, что потребовало создания специализированных комплексов соответствующего ускорительного оборудования и оснастки для проведения облучения пластин большого диаметра. Наиболее развитой на сегодняшний день в научном и практическом отношении является технология модифицирования полупроводников преимущественно легкими ионами высоких энергий - протонами или альфа-частицами с энергиями в диапазоне от 300 кэВ до 20 МэВ [1,2]. Эта технология позволяет с высокой

точностью осуществлять управление временем жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) в локальных слоях полупроводниковых структур вдоль трека пробега легких ионов с возможностью их имплантации на глубины от единиц до сотен микрон. Причем так как скорость введения радиационных дефектов достигает максимальных значений в сравнительно тонком слое в области остановки ионов (обычно порядка нескольких сотен см/сек для протонов), а на начальном участке трека может быть на порядок меньше, то данный метод позволяет реализовать сравнительно простую возможность создания скрытых слоев повышенной рекомбинации в приборных структурах. С другой стороны имплантация протонов например в кремний позволяет провести его локальное слоевое легирование «мелкими» водород-содержащими комплексами донорного типа, что также используется на практике и вместе с возможностью локального управления временем жизни ННЗ эти методы получили особенно широкое применение для коррекции статических и динамических характеристик силовых полупроводниковых приборов.

Для практического использования технологии модифицирования полупроводников пучками ионов высоких энергий требуется наличие достаточно сложного и дорогого ускорительного оборудования совмещенного со специализированным технологическим каналом для проведения облучения пластин различных диаметров. Некоторые крупные компании (например "ABB" или "Semikron") имеют такие комплексы в собственном распоряжении, но основная масса промышленных потребителей данной технологии пользуется услугами сторонних организаций, располагающими мощными ускорительными установками типа циклотронов или линейных ускорителей. В России технологии модифицирования полупроводников пучками ионов высоких энергий развивались преимущественно только в научном плане. В практическом отношении данные технологии применяют сегодня лишь два промышленных предприятия: АО «Протон-Электротекс» (г. Орел) и АО «ПК «ФИД-Техника» (г. С.Петербург). АО «Протон-Электротекс» использует для радиационной обработки своих приборов протоны линию для облучения на базе линейного ускорителя протонов И-2 в ФГБУ «ИТЭФ» (входит в состав НИЦ «Курчатовский институт»), а АО «ПК «ФИД-Техника» пользуется услугами технологической линейки, построенной на базе Уникальной Научной Установки « Циклотрон ФТИ» в ФГБУ ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН.

Линия для облучения на базе ускорителя И-2 в ФГБУ «ИТЭФ» работает при фиксированной энергии пучка протонов равной 24 Мэв, который выводится из вакуумного ионопровода непосредственно на воздух через тонкую металлическую мембрану. Регулировка энергии ионов в пучке при необходимости осуществляется с применением дополнительных металлических мембран соответствующей толщины [3]. Такая схема построения технологической линии достаточно удобна в эксплуатации так как облучаемые приборы располагаются не в вакуумной камере, а в обычной воздушной среде, что упрощает работу с обрабатываемыми ионным пучком приборами. Однако ввиду большой начальной энергии протонов данная линия была рассчитана только на ее применение для коррекции характеристик сравнительно толстых приборных структур с глубокими высоковольтными р-п переходами (в десятки микрон) и толстыми базовыми слоями (в сотни микрон). Этот метод к сожалению практически не может быть эффективно использован для локального модифицирования полупроводников и коррекции характеристик приборов со сравнительно мелкими переходами и тонкими активными слоями, составляющими основную часть ранка производимых на сегодняшний день полупроводниковых приборов. Применение металлических мембран для изменения энергии протонов неизбежно приводит также и к заметной дисперсии протонов по энергиям, что снижает возможности создания локальных слоев с модифицированными свойствами и резкими границами вблизи с облучаемой поверхностью полупроводниковой структуры.

Технологическая линия, построенная на базе УНУ «Циклотрон ФТИ им. А.Ф. Иоффе», лишена этих недостатков так как обеспечивает высокую степень моноэнергетичности ионного пучка в широком диапазоне значений энергии ионов. Это обеспечивает высокую пространственную локальность метода при модифицировании электро - физических свойств кристалла полупроводниковой структуры при любых значениях энергии ионного пучка. Особенности построения данной технологической линии и некоторые примеры ее возможных практических применений будут кратко рассмотрены в настоящей работе.

Конструктивно-технологические особенности построения линейки для модифицирования полупроводников и коррекции характеристик полупроводниковых приборов методами имплантации ионов высоких энергий на УНУ «Циклотрон ФТИ им. А.Ф. Иоффе».

а) Особенности циклотрона ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

На рисунке 1 показан циклотрон ФТИ им. А.Ф.Иоффе – старейший в мире работающий ускоритель класса циклотронов типа У -120, являющийся «классическим» циклотроном с плоскими полюсами магнита весом 90 тонн и внутренним источником ионов типа Пеннинга. Циклотрон ФТИ является уникальным ускорительным комплексом, что подтверждает и присвоенный ему в 2015 году статус Уникальной Научной Установки (УНУ). Уникальность этого ускорителя состоит в возможности ускорения ионов различных масс (от протонов с массой 1 до аргона с массой 40) в широком диапазоне энергий (от 0,8 до 6 МэВ / нуклон для легких ионов и от 0,65 до 1,37 МэВ/нуклон для тяжелых), что обусловлено его специфическими конструктивными особенностями. Среди них необходимо в первую очередь выделить следующие :

- это возможность достаточно оперативного управления величиной и распределением напряженности магнитного поля между полюсами магнита за счет применения «шиммирования», т. е. использования различного рода кольцевых «шимм», размещаемых на «крышках» вакуумной камеры

- использование специального высоковольтного ВЧ - генератора с перестраиваемой частотой в диапазоне от 3 до 12 МГц с индуктивно - кондуктивной системой ввода ВЧ-мощности в резонансную систему циклотрона через открытую передающую систему - Лехерову линию. Такая конструкция циклотрона позволяет получать практически любую требуемую энергию ионов с высокой степенью моноэнергетичности, составляющей порядка (50-100) кэВ в зависимости от заданной величины энергии ионного пучка и массы иона.

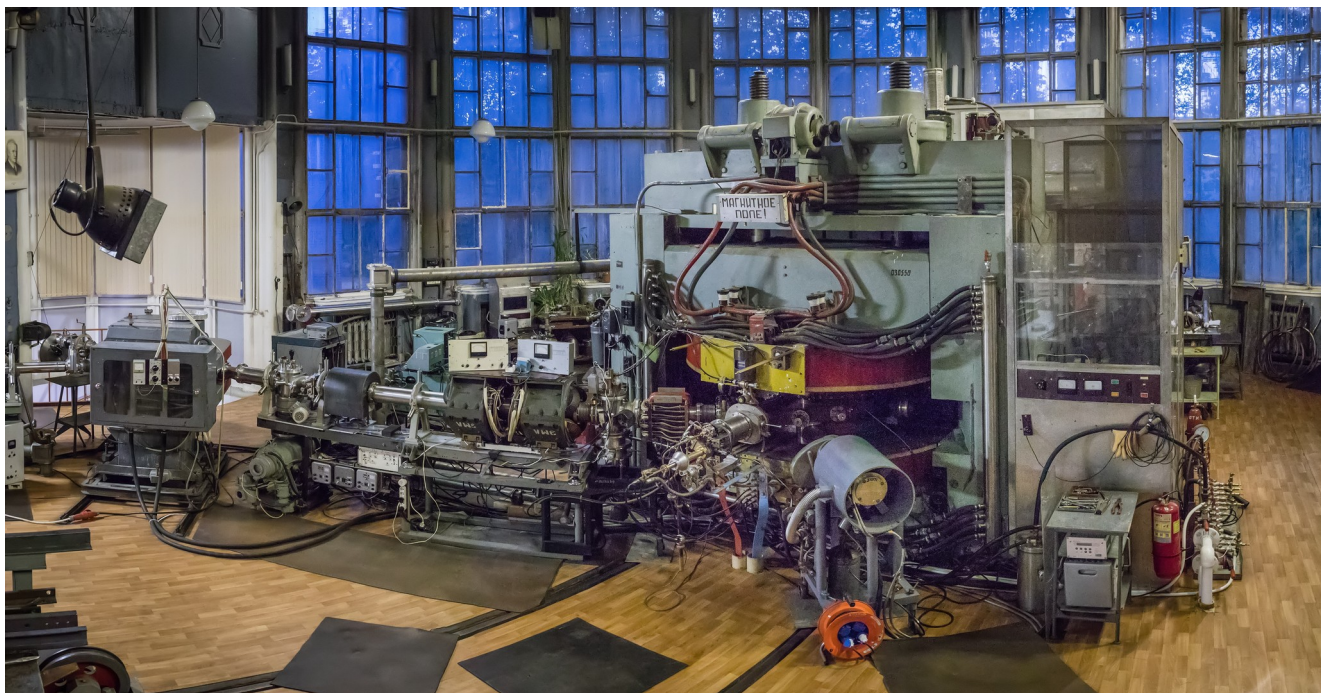


Рисунок 1 – Уникальная Научная Установка «Циклотрон ФТИ»

Таблица 1– Некоторые типы ионов, ускоряемые на циклотроне ФТИ, и соответствующие им диапазоны возможных энергий, а также возможные для этих энергий диапазоны пробегов ионов (на примере кремния

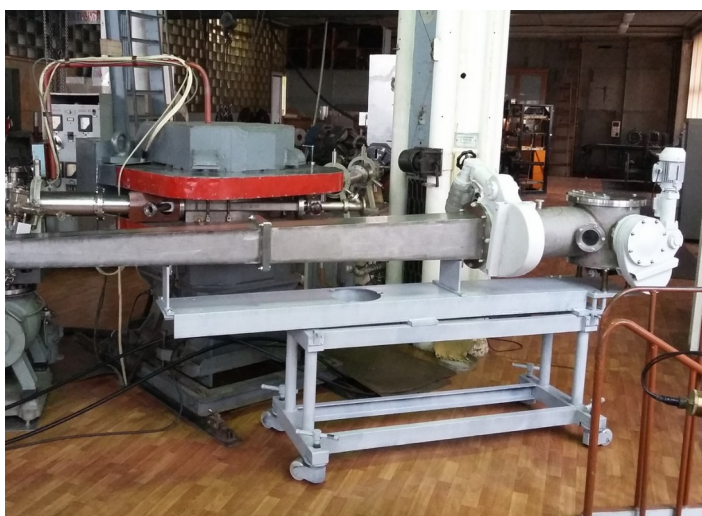
Тип иона	Диапазон возможных энергий, МэВ	Диапазон пробегов в кремнии, мкм
Протоны (p)	0,9 – 6,5	14 ÷ 300
Гелий (α-частицы)	3 - 26	12 ÷ 320
Углерод (C)	8 – 47	7,5 ÷ 58
Азот (N)	9,5 – 62	8 ÷ 61
Кислород (O)	10,5 – 75	8 ÷ 63
Неон (Ne)	13 – 81	8 ÷ 46
Аргон (Ar)	27 – 55	9 ÷ 15

Отмеченные выше уникальные возможности циклотрона ФТИ в совокупности с широтой спектра исследований, проводимых в лабораториях ФТИ, определили его особую привлекательность не только для проведения исследований в области изучения физических основ новых радиационных технологий модифицирования свойств различных материалов (полупроводников, диэлектриков, полимерных материалов), но и для выполнения конкретных прикладных работ. Возможность прецизионной настройки энергии ионов и соответственно глубины их пробега в полупроводниковом кристалле позволили с высокой точностью управлять глубиной модифицирования свойств в структурах полупроводниковых приборов в пределах от единиц до нескольких сотен микрон (таблица 1) без использования для перестройки энергии каких-либо специальных рассеивающих металлических мембран. Это обеспечило возможность достижения высокой локальности такого радиационного метода обработки материалов в широком диапазоне глубин, что оказалось особенно важным фактором для практического применения этой радиационной технологии и в особенности - для коррекции и

оптимизации статических и динамических характеристик высоковольтных полупроводниковых приборов силовой электроники.

Особенности построения систем развертки ионного пучка и вакуумных камер для облучения полупроводниковых пластин и приборных структур.

Для выполнения прикладных работ по радиационной обработке полупроводниковых пластин и коррекции характеристик полупроводниковых приборов на УНУ «Циклотрон ФТИ» была создана отдельная технологическая линия, в состав которой вошла система фокусировки ионного пучка, система отклонения ионного пучка для сканирования пластин и приборных структур различных размеров, система контроля качества пучка (измерения энергии и дозы) и набор конечных вакуумных камер для установки в них облучаемых пластин и приборов. После вывода пучка ускоренных ионов из циклотрона в данную линию он фокусировался квадрупольными магнитными линзами вдоль оси ионопровода в пучок диаметром порядка 5 мм. Далее сфокусированный пучок мог отклоняться в двух плоскостях соответственно магнитной и электростатической системами на угол до 5 градусов при возможной частоте линейного сканирования пучка до 100 Гц, что обеспечивало однородность набора требуемой дозы по всей площади пластин на уровне не хуже 10 %. Для обработки пластин диаметром до 200 мм технологическая линия облучения имела специально сконструированный конечный участок ионопровода длиной 4 метра с расширяющимся по его длине сечением (рисунок 2) и оконечную «большую» вакуумную камеру для облучения пластин диаметром от 70 до 200 мм (рисунок 3). В камере предусмотрена возможность установки держателя для 6 пластин (держатель в виде шестигранника, на каждой из плоскостей которого размещается пластина-образец диаметром от 76 до 150 мм) либо для 4 пластин (в случае пластин диаметром 200 мм). Оконечная большая вакуумная камера с открытой вакуумной крышкой и держателем для 4-х пластин диаметром до 200 мм представлена на рисунке 3б.



а)



б)

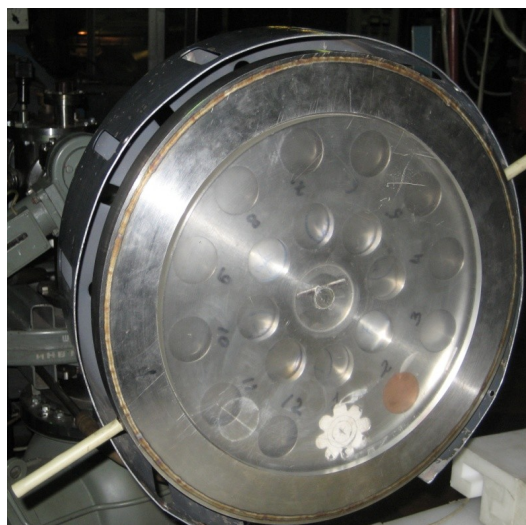
Рисунок 2 – Конечный участок ионопровода с разделяющим его шибером и конечной большой вакуумной камерой для облучения пластин диаметром от 70 до 200 мм.

(а – общий вид, б – оконечная большая вакуумная камера с открытой вакуумной крышкой и держателем для 4-х пластин диаметром до 200 мм)

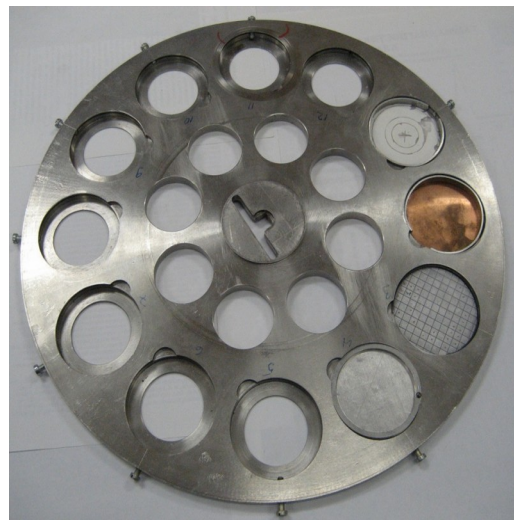
В большой камере возможна установка сменных держателей с шестью гранями, на каждой из которой можно разместить по одной пластине диаметром от 76 до 150 мм (всего до 6-ти пластин), либо держателей с 4-мя гранями для пластин диаметром до 200 мм (всего до 4-х пластин на держателе). Конструкция оконечной вакуумной камеры позволяет проводить быструю смену держателей с образцами так как камера полностью «отсекается» от вакуумной системы циклотрона и ионопровода с помощью вакуумных заслонок и имеет собственную систему откачки мощными турбо-молекулярными насосами. Для проведения радиационных обработок пластин диаметром до 60 мм технологическая линия не требует необходимости применения описанных выше оконечных устройств (дополнительного участка расширяющегося ионопровода и большой оконечной вакуумной камеры). В этом случае для радиационных обработок пластин и приборных структур возможно использовать вакуумную камеру, фотография которой приведена на рисунке 3а. В данной камере имеется возможность без ее развакуумирования проводить последовательную обработку до 12-ти образцов, каждый из которых устанавливается в позицию для облучения ионным пучком путем вращения барабана с использованием для его поворота ручной передачи вращающего момента через вакуумный узел «Вильсона».

Также технологическая линия радиационно-ионной обработки образцов включает в свой состав вакуумную камеру, предусматривающую возможность непрерывного вращения облучаемых образцов во время набора дозы. Для этого используется специальная камера и оснастка, разработанная для производства трековых

мембран (рисунок 3б), в которой имеются механизмы вращения барабанов с рулонными пленочными материалами , приводимые в движение электрическими приводами. Специальная оснастка позволяет устанавливать в данной камере сборки полупроводниковых дисков или полупроводниковых приборных структур (например сборки структур высоковольтных силовых приборов) и проводить ионное облучение их краевого контура в режиме линейного сканирования ионным пучком по боковой поверхности сборки при ее вращении вокруг своей оси . Такая технология позволяет проводить одновременную обработку сборок из полупроводниковых пластин высотой до 100 мм и диаметром до 30 мм.



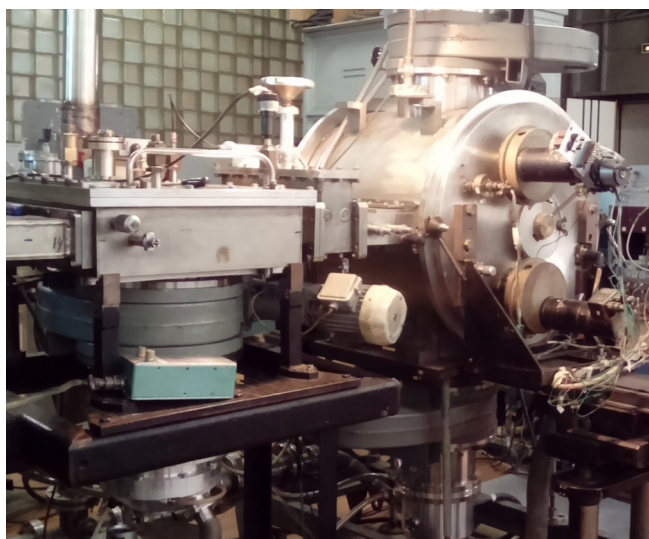
а)



б)

Рисунок 3 – Вакуумная камера для ионной обработки 12-ти полупроводниковых структур диаметром до 60 мм .

(а – общий вид, б – внешний вид барабана с гнездами для установки 12-ти структур диаметром (56-60) мм либо специальных держателей приборных структур меньшего диаметра)



а)



б)

Рисунок 4 – Вакуумная камера для ионного облучения сборок полупроводниковых пластин и приборных структур в режиме линейного сканирования и вращения облучаемых образцов

(а – вид камеры со стороны электроприводов вращения образцов и загрузочной стенки камеры, б – вид камеры со стороны глухой стенки)

Таким образом УНУ «Циклотрон ФТИ» в совокупности со специализированной технологической линией , включающей системы транспортировки, развертки и контроля ионного пучка, а также несколько вариантов специальных вакуумных камер, позволяет осуществлять радиационную обработку полупроводниковых образцов (пластин, приборных структур и чипов полупроводниковых приборов различных размеров) с целью

модифицирования электрофизических свойств полупроводниковых материалов и коррекции характеристик полупроводниковых приборов. Рассмотрим некоторые возможности практического применения данной технологической линии на примере приборов и структур силовой электроники.

Примеры практического использования технологической линии модифицирования полупроводников на базе УНУ «Циклотрон ФТИ» для коррекции характеристик приборных структур силовой электроники.

1. Полупроводниковые лавинные ограничители напряжения.

Облучение протонами использовалось для создания в центральной рабочей зоне приборной структуры области однородного лавинного пробоя при значениях напряжения на (10-15) % ниже уровня напряжения пробоя, развивающегося в краевой (периферийной) части приборных структур. Понижение напряжения пробоя в центральной зоне проводилось за счет контролируемого введения при облучении протонами дополнительных к исходному легированию n- базы мелких донорных центров, в состав которых входил имплантированный водород. Это позволило устранить локализацию пробоя в периферийной части приборных структур и на сотни процентов увеличить рабочий импульсный ток таких лавинных ограничителей напряжения: с типичного уровня в десятки ампер до уровня в несколько сотен ампер для лавинных ограничителей с рабочими напряжениями в пределах (1-2) кВ [4].

Использовались лавинные ограничители напряжения симметричные серии ОНС 233 и им подобные на рабочие напряжения (1100-1600) В производства заводов АО «Протон-электротекс» (г. Орел) и АО «Электровыпрямитель» (г. Саранск).

2. Мощные высоковольтные фото-тиристоры серий ТФ и реверсивно включаемые динисторы серии РВД.

а) Облучение протонами использовалось для создания локальных зон однородного лавинного пробоя с пониженным на (15-20) % напряжением пробоя в центральной части управляющего электрода полупроводниковой структуры фото-тиристоров. Снижение напряжения пробоя осуществлялось за счет эффекта, аналогичного описанному в случае лавинных ограничителей. В экспериментах использовались тиристоры серий ТФ на рабочие напряжения до 8 кВ, в которых для реализации функций автозащиты от перенапряжения и предотвращения выхода приборов из строя при перенапряжении в области управляющего электрода прибора путем имплантации водорода на заданную глубину создавалась область «безопасного» включения прибора аналогично описанной в [5]. Такая технология позволила исключить выход из строя дорогостоящих тиристоров и высоковольтных коммутаторов на их основе при возникновении аварийных ситуаций в высоковольтных линиях передач электроэнергии.

б) Облучение протонами или альфа частицами с созданием области повышенной рекомбинации в n-базе динисторов серии РВД на рабочие импульсные токи до 25 000 А и напряжения до 2 кВ применялось с целью уменьшения времен выключения динисторов до уровня (6-8) мкс при максимальном уровне напряжения в проводящем состоянии на включенной структуре U_{TM} не более 4 В [6]. Аналогичные мощные коммутаторы, например тиристоры серии ТБ 353-1000, изготовленные с применением обычной технологии электронного облучения, имели времена выключения более 30 мкс при U_{TM} более 8 В и имели почти на порядок большие коммутационные потери.

В экспериментах использовались приборы производства завода АО «Электровыпрямитель» и АО «Протон-электротекс».

3. Диоды быстросовосстанавливающиеся. В экспериментах использовались диодные структуры типов AN30FRD06, AN30FRD12, AN30FRD1 AN120FDR25, AN100FDR33, AN60FDR45, AN50FDR65 на напряжения (600 – 6500) В и токи (30 – 120) А производства компании «Ангстрем» (г. Москва) и диоды быстросовосстанавливающиеся типов KD01120UF, KD2560SF, KD25120, KD50120, KD10120UF на напряжения (600 – 1200) В и токи (1 – 50) А от «ВЗПП-Микрон» (г. Воронеж).

Облучение протонами, альфа частицами или ионами аргона в комбинации с электронным облучением применялось для с создания области повышенной рекомбинации в n-базе диодов вблизи p-n перехода с целью достижения наиболее мягкого характера восстановления диодов (с коэффициентом мягкости К более 1 при наименее слабом повышении после облучения падения напряжения на диодах в проводящем состоянии U_f . Время обратного восстановления диодов в случае ионного облучения было уменьшено до значений 60и 600 нсек для диодов на 1200 В и 6500 В соответственно с сохранением мягкого характера восстановления и допустимого уровня U_f^{max} . Такое соотношение динамических и статических характеристик диодных структур оказалось невозможно реализовать без существенного превышения U_f^{max} и сохранения мягкого характера восстановления диодов в случае применения обычных режимов коррекции частотных характеристик методами электронного облучения. Следует отметить, что технологическая линейка на базе циклотрона ФТИ может быть с успехом использована как для коррекции характеристик силовых мощных диодов с глубокими p-n переходами (продукция таких предприятий как АО «Протон-электротекс» и АО «Электровыпрямитель»), так и для случая диодных структур со сравнительно мелкими p-n переходами, производимых по «микроэлектронной» технологии (продукция АО «Ангстрем», АО «ВЗПП-Микрон», группы компаний «Кремний» и др). Особенно перспективным вариантом технологии коррекции частотных характеристик приборных диодных структур с мелкими переходами

может стать технология на основе их обработки пучками сравнительно тяжелых ионов, например ионов аргона [7], позволяющих в сравнении с легкими ионами обеспечить более высокую производительность процессов за счет более высоких скоростей введения радиационных дефектов тяжелыми ионами (более 10^3 см/сек).

4. Биполярные транзисторы с изолированным затвором типов ANG50B120U, ANG75B60U, ANGB20B60, ANGP20B60, ANGB12B60U, ANGP12B60U на напряжения (600-1200)В и токи 12-75А производства компании АО «Ангстрем» (г. Москва).

Облучение протонами или альфа частицами применялось для создания области повышенной рекомбинации в п-базе транзисторов вблизи р⁺-эмиттера с целью снижения коммутационных потерь при выключении транзистора (за счет уменьшения амплитуды и длительности тока, протекающего через транзистор при его выключении на фазе восстановления напряжения на транзисторе и спада протекающего через него тока, т.е. во время так называемой фазы «хвоста» обрыва тока. Показано, что создание локальных зон повышенной рекомбинации при таком ионном облучении позволяет в сравнении с обычным электронным облучением добиться в несколько раз меньших значений коммутационных потерь при выключении транзисторов и повысить частотный предел работы IGBT до уровня вплоть до 100 кГц, тогда как приборы с электронным облучением обычно способны работать на частотах не более 20 кГц. Аналогичные результаты были достигнуты и в экспериментах по коррекции характеристик мощных биполярных транзисторов. Например для транзисторов на рабочее напряжение 1200В и ток 10 А производства компании «Samsung» протонное облучение позволило повысить верхний частотный предел работы транзисторов до уровня 75 кГц практически без ухудшения статических характеристик.

Приведенные примеры не охватывают всего разнообразия результатов, достигнутых с применением рассмотренной выше технологической линейки радиационного модифицирования полупроводников и носят скорее описательный характер без раскрытия конкретных деталей и режимов использованных процессов. Это обусловлено необходимостью сохранения «know how» в части разработанных технологий. Перечисленные примеры относятся только к силовым приборам на основе кремния тогда как аналогичные работы проводились и для других полупроводниковых приборов и материалов (SiC, GaAs и GaN), однако эти результаты являются темой для отдельных публикаций.

Заключение.

Приведенные выше материалы и перечисленные выше примеры конкретных практических применений технологии модифицирования полупроводников пучками ионов высоких энергий и коррекции характеристик приборов на их основе не претендуют на полноту изложения этой проблематики и не охватывают все имеющиеся в этой области результаты. Авторы данной работы хотели проинформировать ее читателей лишь о создании в России многопрофильной технологической линейки на базе УНУ «Циклотрон ФТИ» и широких возможностей ее применения для модифицирования полупроводников. Авторы считают, что новизна выполненного комплекса работ по данной теме состояла не только в разработке конкретных технологических режимов коррекции характеристик полупроводниковых приборов различных классов и в исследовании особенностей модифицирования полупроводников ионными пучками, а и в построении уникальной радиационно-технологической линии обработки полупроводниковых материалов и приборов пучками ионов различной массы и энергии. Такая линия не имеет аналогов в России и может служить базой для дальнейшего развития новых технологий радиационного модифицирования полупроводников и особенно при комплексном взаимодействии заинтересованных в таких технологиях организаций и предприятий.

Список литературы

1. В.А. Козлов, В.В. Козловский. Легирование полупроводников радиационными дефектами при облучении протонами и alpha-частицами. Обзор. // ФТП, т. 35, № 7, 2001, с. 769-795.
2. В.В. Козловский, В.Н. Ломасов, В.А. Козлов. Модифицирование полупроводников пучками протонов. // ФТП, т. 34, № 2, 2001, с. 129-147.
3. В. Губарев, А. Семенов, А. Сурма, В. Столбунов. Технология протонного облучения для улучшения характеристик силовых диодов и тиристоров. // <http://www.proton-electrotex.com/ru/articles/tehnologiya-protonnogo-oblucheniya>.
4. Ю.М. Локтаев, А.В. Ставцев, А.М. Сурма, А.А. Черников. Новые силовые полупроводниковые приборы производства ЗАО «Протон-Электротекс» // <http://www.proton-electrotex.com/ru/articles/novye-silovye-poluprovodnikovye>.
5. Ю.М. Локтаев, А.М. Сурма, А.А. Черников. Новые высоковольтные мощные тиристоры со встроенными в полупроводниковую структуру элементами защиты в аварийных режимах: защита от перенапряжения. // <http://www.proton-electrotex.com/ru/articles/novye-vysokovoltnye-moshhnye-22>.
6. И.В. Грехов, В.А. Козлов, С.В. Коротков, Л.С. Костина, И.В. Еремин, А.Г. Андреев. Быстродействующий РВД для мощной импульсной и преобразовательной техники. // Известия РАН. Энергетика, № 4, 1996, с. 106-113.
7. V. Kozlov, D. Mitina, M. Kudoyarov, M. Kozlovski, I. Shulpina, V. Eremin, E. Verbitskaya, V. Ratnikov. Characterization of surface layers created in silicon diode structures by argon implantation. // 20-th Int. Conf. on Surface Modification of Materials by Ion Beams "SMMIB-2017", Lisbon, Portugal, Book of abstracts, p.164.

