



СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

98-6

P13-98-6

Т.И.Балалыкина, В.Н.Виноградов, И.А.Голутвин,
А.П.Дергунов, В.В.Елша, Н.И.Замятин, Ю.Л.Злобин,
Е.В.Зубарев, Г.А.Иванов, В.Д.Калагин, И.О.Лукьянов,
Н.М.Лустов, А.П.Маркелов, В.М.Нехаев, А.А.Сабаев,
Л.В.Светов, В.А.Сергеев, С.Я.Сердюков, Н.Ю.Сусова,
С.Ю.Удовенко, Е.Б.Фефелова, В.С.Хабаров,
В.В.Чалышев, А.Е.Черемухин, П.Ф.Черняев, И.В.Шпак,
А.Г.Щербаков

«ЧИСТАЯ ЗОНА» ДЛЯ РАЗРАБОТКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ
В ЛСВЭ ОИЯИ

1998

Введение

При изготовлении кремниевых и других полупроводниковых детекторов в настоящее время широко используется планарная технология и оборудование, применяемое при производстве микросхем. Опыт совместной работы ЛСВЭ с предприятиями электронной промышленности СССР и России показал, что разработка и производство новых типов полупроводниковых детекторов будут существенно ускорены, если отдельные технологические операции и испытания опытных образцов будут проведены в лабораторных условиях. Кроме этого, тестовые структуры необходимы для исследования радиационной стойкости полупроводниковых материалов и детекторов [1]. Детекторные структуры для радиационных тестов могут быть изготовлены в такой лаборатории.

Изготовление полупроводниковых детекторов по планарной технологии требует особо чистой технологической среды "чистых зон" (воздуха, жидкостей и газов, применяемых в технологическом процессе). Загрязнения на поверхности полупроводникового материала (подложке) твердыми частицами или посторонними веществами, осаждаемыми из технологической среды, могут действовать как дефект маски при фотолитографии или паразитный источник диффузии в объем полупроводника при термических операциях. "Чистые" производственные помещения (комнаты) должны соответствовать стандартам, определяющим их класс, и быть пригодными для изготовления приборов с заданными параметрами. Основным источником вносимых дефектов [2] при изготовлении приборов является обслуживающий персонал - 35% от общего количества регистрируемых факторов. По 25% вносят химреакции техпроцесса и оборудование с оснасткой, 8% - газы и химикаты, 7% - воздух в помещении при требуемом классе чистоты. Дефекты могут быть как механическими нарушениями поверхностных свертонких слоев, так и результатом физико-химического взаимодействия нежелательной примеси с веществом подложки. Как показывает практика, 80% дефектов при планарной технологии являются механическими нарушениями, вызываемыми мелкодисперсными частицами, взвешенными в технологической среде.

1. Конструкция "чистой зоны"

Для размещения технологического оборудования и стабильного поддержания параметров технологической среды на необходимом уровне в корпусе 215 ЛСВЭ было создано специальное помещение с системами очистки воздуха и воды ("чистая" комната). Общий вид показан на рис.1 (фото Ю.А.Туманова).

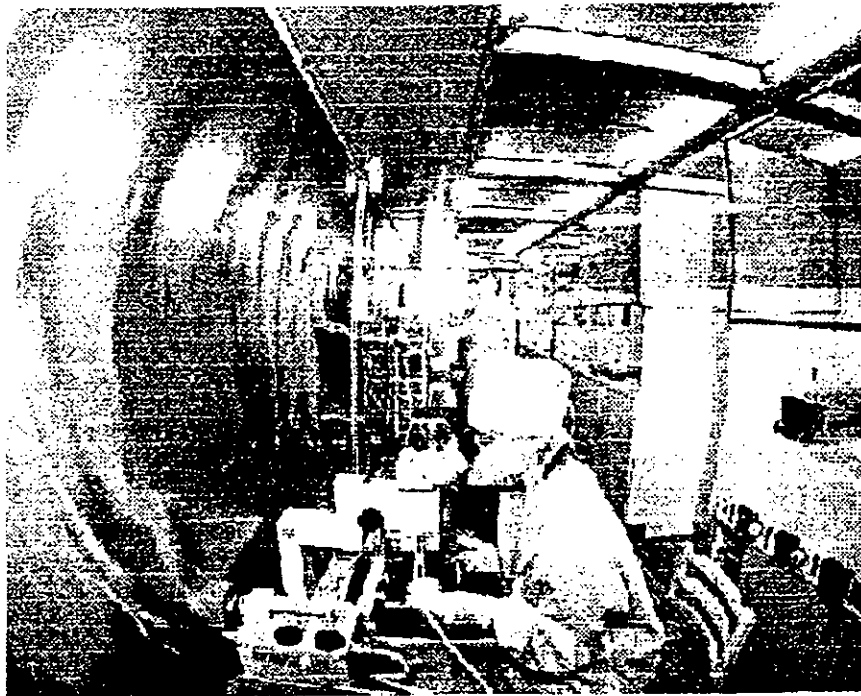
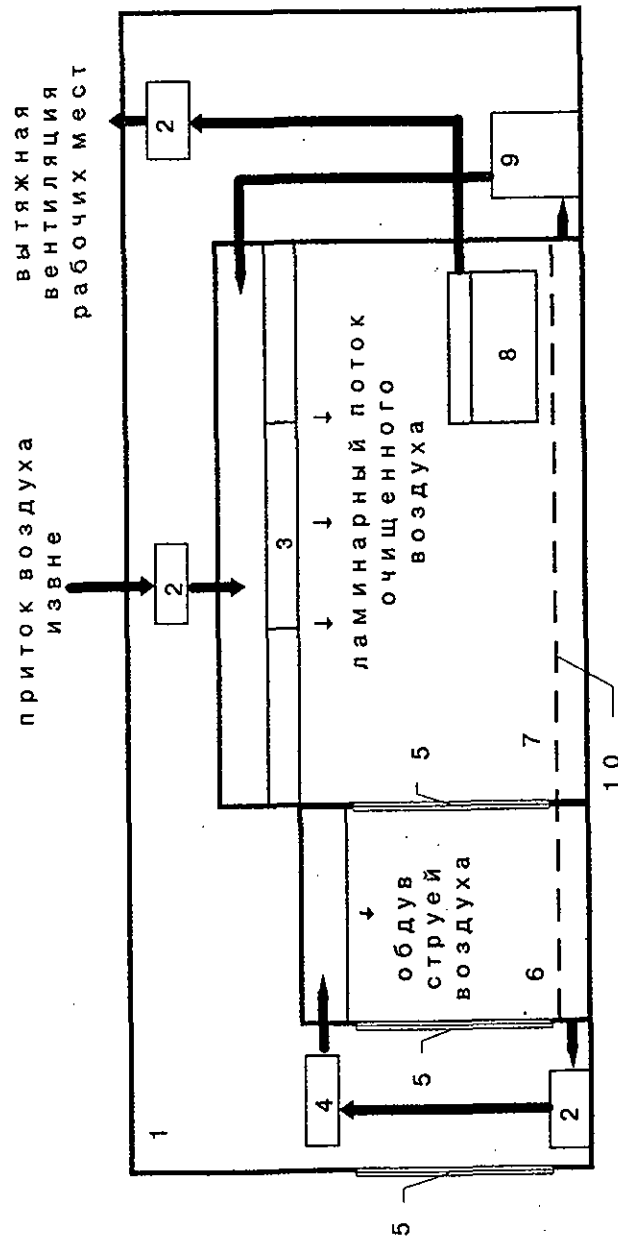


Рис.1. Общий вид "чистой зоны"

Для получения особо чистого воздуха применен зональный метод очистки типа "объем в объеме". Внутри обычного помещения создано герметичное помещение ("чистая" комната), в которое нагнетается кондиционированный и очищенный от пыли воздух. Для очистки воздуха применяются серийно выпускаемые блоки К-4. Схема очистки воздуха показана на рис.2. В "чистой" комнате размещено промышленное оборудование для создания на



полупроводниковых подложках планарных приборов методом жидкостной фотолитографии. "Чистая" комната состоит из двух помещений общей площадью 75 м², соединенных "чистым" коридором. Попасть снаружи в "чистый" коридор можно только через шлюзовую тамбур после обдува чистым воздухом. В одной из "чистых" комнат, с более высокими требованиями к чистоте воздуха (класс лучше, чем 100), размещено оборудование для фотолитографии, в другой - диффузионные печи и установки для обработки полупроводниковых подложек в жидкостях. В "чистом" коридоре имеется шкаф для спецодежды. Применяемое оборудование позволяет получать деионизованную воду с удельным сопротивлением 15+18 МОм·см, свободную от частиц размером более 0,5 мкм (класс "А"), и доставлять ее к установкам по трубам из прессованного полиэтилена. На первом этапе очистки водопроводная вода поступает в дистиллятор, а затем однократно проходит через ионообменные смолы и поступает в бак-накопитель.

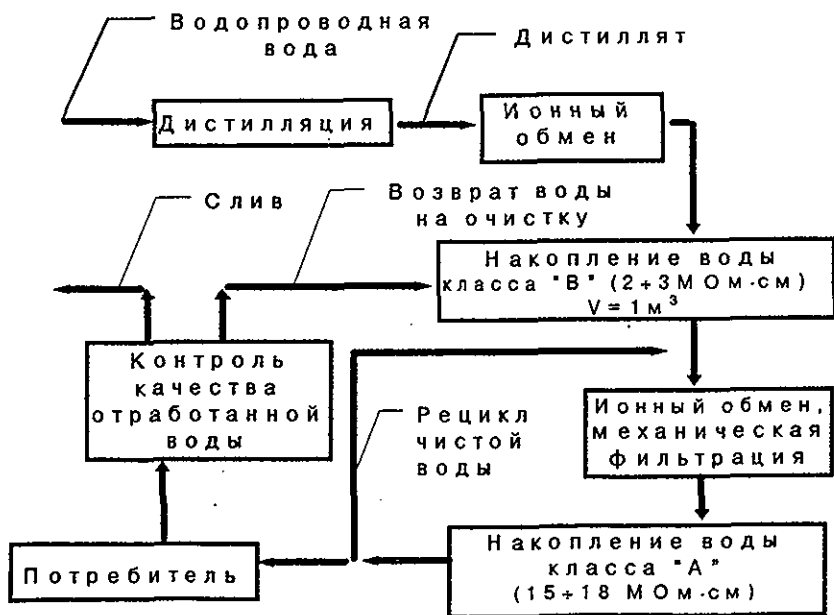


Рис.3. Схема очистки воды в "чистой зоне".

В последующем, непосредственно перед использованием, вода класса чистоты "В" (3 МОм·см) поступает из бака-накопителя

на устройства финишной очистки, где многократно проходит через ионообменные смолы и фильтры тонкой очистки. Использованная вода, в зависимости от степени загрязнения поступает либо в бак-накопитель, либо в канализацию. Схема очистки воды показана на рис.3.

Степень чистоты воздуха на рабочих местах соответствует классу 100 - менее 100 пылинок размером больше 0,5 мкм в кубическом футе (27,8 л) воздуха и классу лучше 1000 - в остальных помещениях. Очистка рабочего объема "чистой" комнаты от пыли, внесенной людьми, происходит за 30+50 мин. Результаты замеров чистоты воздуха в разных местах "чистой зоны" приведены на рис.4.

Замеры проводились счетчиком аэрозольных частиц ПК.ГТА-0,3-02. Степень чистоты химреактивов, применяемых при

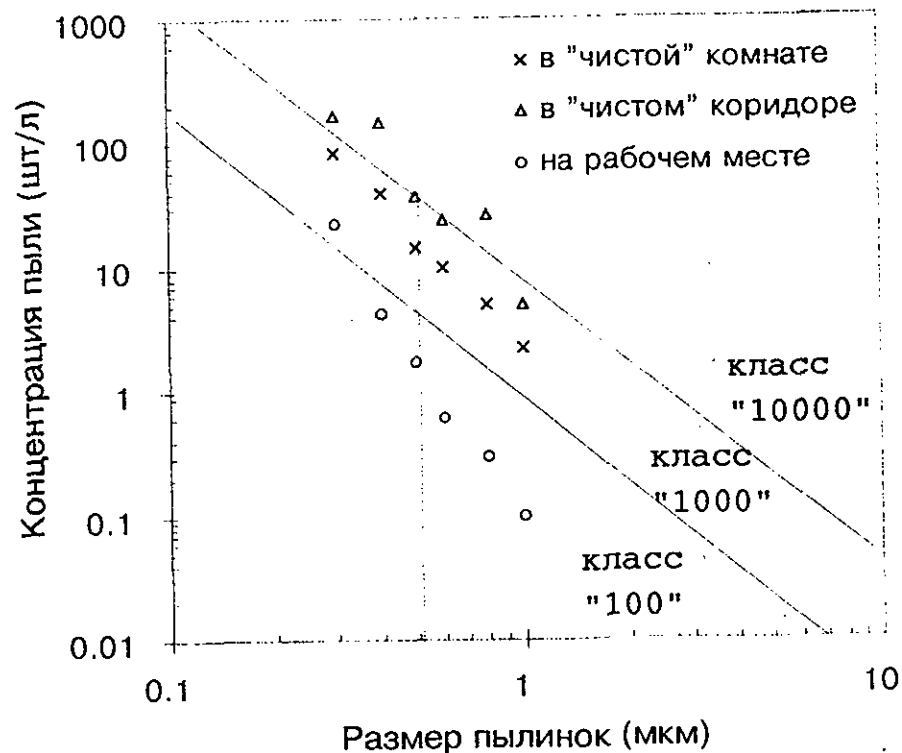


Рис.4. Результаты замеров чистоты воздуха в "чистой зоне"

изготовлении детекторов должна соответствовать классу ОСЧ (особо чистые). Применение автоматов на операциях фотолитографии позволяет снизить до минимума время контакта оператора с обрабатываемыми пластинами, что способствует уменьшению количества дефектов на готовых детекторах.

Расположение технологического оборудования внутри "чистой" комнаты схематически показано на рис.5.

За пределами "чистой" комнаты расположены:

- установка ионно-лучевая "Везувий-1" для имплантации ионов легирующей примеси в подложку;
- вакуумный универсальный пост "ВУП-5", 2шт., для напыления металлических слоев на подложку;
- полуавтомат скрайбирования пластин "Алмаз-М" для резки пластин на отдельные приборы;
- установка ультразвуковой сварки УСЗМ-2,5 для соединения контактных площадок детекторов алюминиевой проволокой диаметром 27 ± 50 мкм;

Данный комплекс оборудования позволяет:

- обрабатывать пластины кремния толщиной 300 ± 500 мкм, диаметром 60 ± 100 мм в растворах с регулируемой температурой от 20 до 200 °С;
- проводить в кварцевых реакторах при продуве сверхчистыми газами (O_2 , N_2 , Ar) операции окисления и отжига кремниевых пластин при температуре до 1200°С;
- создавать в кремниевых пластинах легированные p^+ - и n^+ -слои имплантацией ионов бора и фосфора с энергией в диапазоне 50 ± 150 кэВ;
- напылять металлические слои на поверхность полупроводниковых пластин;
- проводить процессы жидкостной фотолитографии на кремниевых пластинах;
- совмещать с точностью ± 1 мкм и экспонировать через стеклянный фотошаблон слой фоторезиста на поверхности кремниевой пластины.

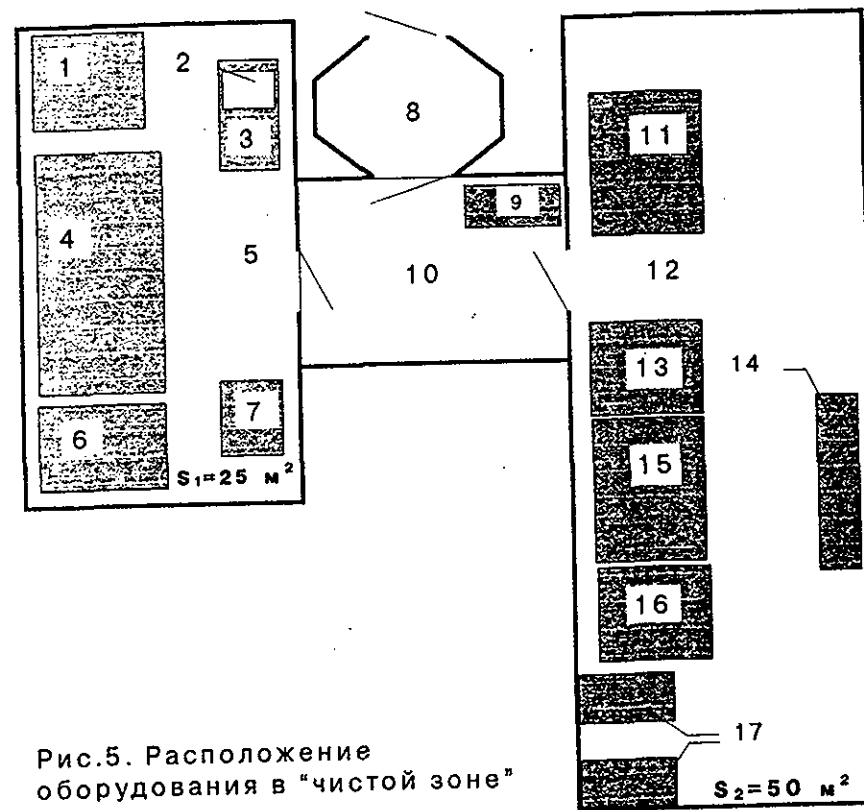


Рис.5. Расположение оборудования в "чистой зоне"

1. Установка совмещения и экспонирования "ЭМ-576А".
2. Микроскоп "МСПЭ-1"
3. Стол
4. Линия фотолитографии "Лада-125". (Автомат нанесения, проявления, ИК-сушки фоторезиста).
5. Помещение для фотолитографии.
6. Автомат гидромеханической отмывки пластин "04ЧЩ-125-005".
7. Автомат гидромеханической отмывки фотошаблонов "04ЧЩ-127-006".
8. Шлюз.
9. Шкаф.
10. "Чистый" коридор.
11. Установка химобработки "Лада-212" для органических веществ.
12. Помещение для химических и термических операций.
13. Установка отмывки и сушки пластин "ЧПВС-0/1500".
14. Стеллаж.
15. Установка химобработки "Лада-212" для неорганических веществ.
16. Установка химобработки "Лада-202" для плавиковой кислоты.
17. Электропечь однозонная диффузионная "СДО-125/3"

2. Планарная технология на кремнии

Основными процессами планарной технологии (рис.6) являются:

- окисление;
- фотолитография;
- имплантация и диффузия легирующих примесей;
- напыление металлических слоев.

Планарная технология обладает следующими преимуществами:

1. Высокая стабильность параметров получаемых приборов.
2. Возможность одновременной обработки многих приборов, что позволяет получить приборы с близкими характеристиками.
3. Возможность автоматизации процессов.
4. Универсальность технологии (разные приборы на пластине, изготовленные в рамках одного процесса).
5. Возможность создания интегральных структур из-за простоты соединений между приборами на плоскости.

К недостаткам технологии относятся высокие требования к качеству подготовки поверхности пластины (полированная поверхность класса 14).

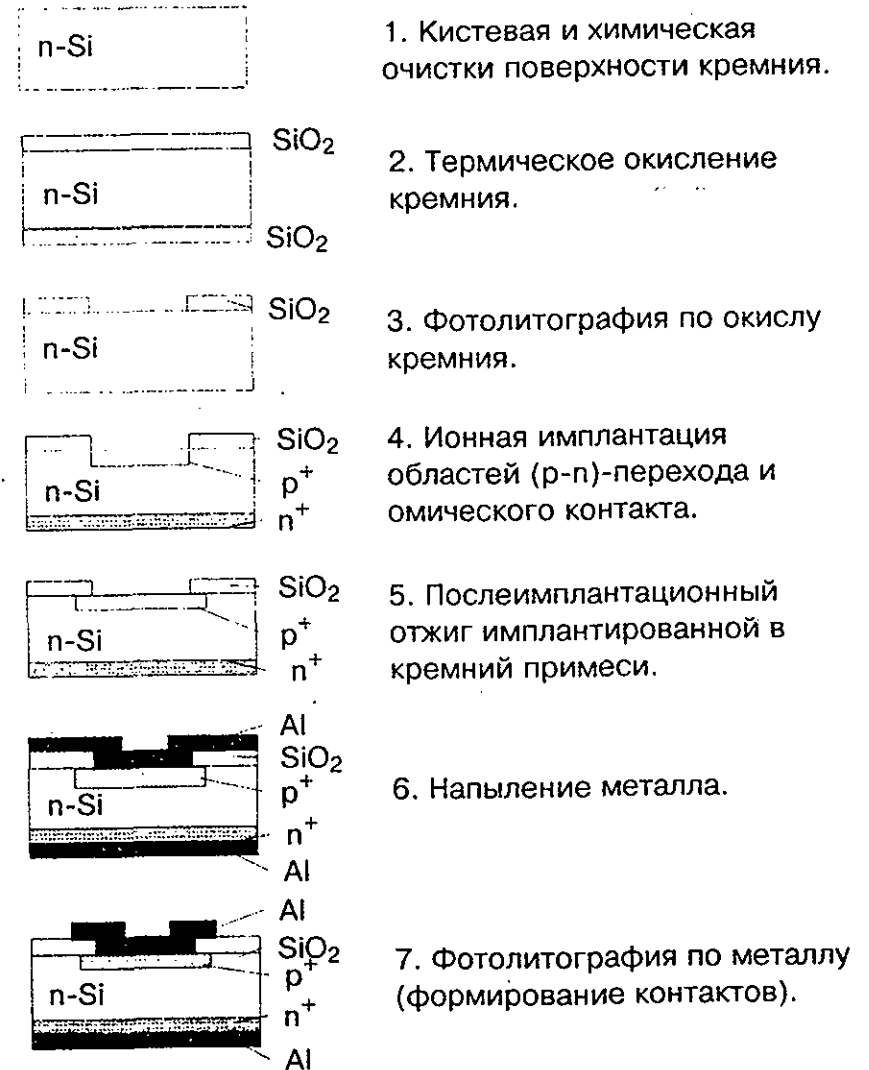


Рис.6. Основные процессы планарной технологии

2.1. Окисление

В основе планарной технологии лежат свойства окисла кремния (SiO_2) и процесс фотолитографии. Двуокись кремния SiO_2 (кварц) является хорошим диэлектриком и обладает свойством пассивировать поверхность кремния, уменьшая плотность поверхностных состояний (уровни Тамма) с 10^{15} см^{-2} до 10^{11} см^{-2} . Кроме того, SiO_2 является качественной маской при диффузии и имплантации в кремний легирующих примесей бора, фосфора, мышьяка, сурьмы и др.

В условиях данной технологической лаборатории можно выращивать пленки SiO_2 толщиной до 1 мкм как в сухом, так и в увлажненном кислороде с геттерирующими добавками паров HCl методом термического окисления в диффузионных печах СДО 125/3.

2.2. Фотолитография

Фотолитография позволяет сформировать необходимый рисунок на поверхности обрабатываемого слоя пластины с помощью света и стеклянных фотошаблонов. Рисунок, вначале полученный на пленке нанесенного светочувствительного полимера (фоторезиста) травлением, впоследствии переводится на обрабатываемый слой подложки. Разрешающая способность фотолитографии определяется длиной волны используемого света. Фотолитография - совокупность фото и физико-химических процессов, применяющихся для формирования структуры детектора на поверхности полупроводниковой пластины. При этом используется несколько операций, как правило, не зависящих от обрабатываемого слоя и типа изготавливаемого прибора.

Основные операции фотолитографии:

- нанесение фоторезиста на поверхность пластин с помощью центрифуги;
- сушка фоторезиста инфракрасным излучением;
- экспонирование фоторезиста ультрафиолетом через фотошаблон для соответствующего слоя;
- проявление фоторезиста;

- задубливание фоторезиста;
- травление обрабатываемого слоя пластины через маску фоторезиста;
- удаление фоторезиста.

Фоторезист - светочувствительный полимер, который в жидком виде наносится на поверхность обрабатываемой пластины центрифугированием. Применяются позитивные фоторезисты ФП-51ШВ и AZ-1350, у которых при проявлении удаляются засвеченные области. В процессе сушки происходит удаление растворителя из тонкой ($0,5 \div 1,0 \text{ мкм}$) пленки фоторезиста. Проявление засвеченных областей проводится в щелочи, при этом скорость растворения засвеченных областей примерно в 10 раз выше, чем незасвеченных. Задубливание - термическая операция, при которой происходит сшивка молекул полимера. Таким образом, на пластине создается маска, не чувствительная к неорганическим травителям. После травления обрабатываемого слоя пластины фоторезист может быть снят в органическом растворителе. Во время фотолитографии важно обеспечить хорошую адгезию фоторезиста к обрабатываемому слою SiO_2 и максимально чистые условия на всех этапах.

2.3. Имплантация (ионное легирование)

Сущность метода ионного легирования заключается в бомбардировке образца (кремниевой пластины) сепарированными в магнитном поле и ускоренными до энергии $50 \div 150 \text{ кэВ}$ ионами. При этом в приповерхностном слое создается определенное распределение концентрации легирующей примеси. Глубина легированного слоя зависит от энергии пучка, типа ионов и типа мишени, а концентрация - от дозы имплантации. Легированный слой получается сильно дефектным (с нарушениями кристаллической решетки), поэтому необходим дополнительный отжиг ($600 \div 1000^\circ\text{C}$) в печи СДО - 125/3. Для легирования определенных областей пластины применяют маски из окисла или полимера (фоторезиста). Для создания p^+ -области в n -кремнии применялась имплантация ионов бора с энергией 53 кэВ и дозой

50 мкКл/см², а для создания p⁺-области проводилась имплантация ионов фосфора с дозой 100÷150 мкКл/см² на ионно-лучевой установке "Везувий -1".

2.4. Напыление

Нанесение металлических пленок производится в установках ВУП-5 испарением в вакууме навески необходимого металла электронным лучом с энергией 10 кэВ. Этим способом можно получать пленки практически любых металлов. Требуемый рисунок металлического слоя также создается операцией фотолитографии по металлу.

Основные процессы планарной технологии, применяемые в настоящее время в данном технологическом комплексе, показаны на рис 6. Эти операции могут несколько раз циклически повторяться в зависимости от конструкции прибора.

3. Экспериментальные результаты

Основной целью технологических экспериментов в "чистой зоне" была наладка технологического оборудования для планарной технологии и создание стартовой технологии изготовления планарных кремниевых детекторов ионизирующих излучений. Детекторы изготавливались из высокоомного кремния, выращенного методом бестигельной зонной плавки (БЗП - кремний, или FZ - silicon). Для изготовления детекторов применялся монокристаллический кремний марки КАД, изготовленный в СССР (Запорожье, ЗТМК), со следующими параметрами:

- удельное сопротивление от 1 до 6 кОм·см;
- ориентация кристалла - $\langle 111 \rangle$;
- тип проводимости - n - электронный;
- время жизни неосновных носителей заряда - около $0,5 \cdot 10^{-3}$ с;
- максимальная неоднородность удельного сопротивления на пластине до 50%.

В каждом сеансе в технологический цикл запускалась партия пластин кремния в количестве 5÷8 штук, пластины были с

двухсторонней полировкой, толщиной 320 ± 20 мкм, применялись пластины двух диаметров - 60 и 76 мм.

Контроль параметров детекторов проводился на пластине, до и после резки пластины на отдельные детекторы, измерялись статические I-V (вольт-амперные) и C-V (вольт-фарадные) характеристики для оценки величины темного тока утечки, напряжения пробоя и напряжения полного обеднения детектора, это основные эксплуатационные характеристики детекторов. Ток утечки детектора является одним из главных источников шума при измерении энергетического разрешения детектора и служит хорошим индикатором "загрязнения" детектора в процессе изготовления. Напряжение пробоя (U_B) дает информацию о качестве инжектирующего (p-n)-перехода и о качестве выращенного окисла SiO₂. Напряжение полного обеднения (U_{FD}) позволяет точно знать удельное сопротивление в объеме кремния, минимальную геометрическую емкость детектора и оценить качество омического контакта n⁺n. Если при $U_D = U_{FD}$ нет резкого увеличения обратного тока (нет инжекции с омического контакта), то можно говорить, что контакт имеет плоский профиль легирования и хорошо отожжен.

Структура (p⁺np⁺)-детектора приведена на рис.7.

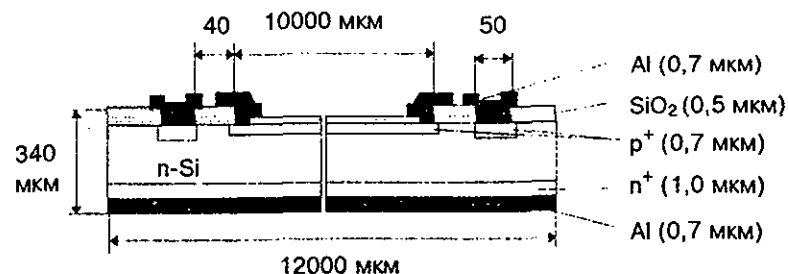


Рис.7. Детектор с имплантированным (p-n)-переходом

Типичные (I-V) и (C-V) характеристики детекторов, изготовленных при отладке оборудования и технологии, показаны на рис.8.

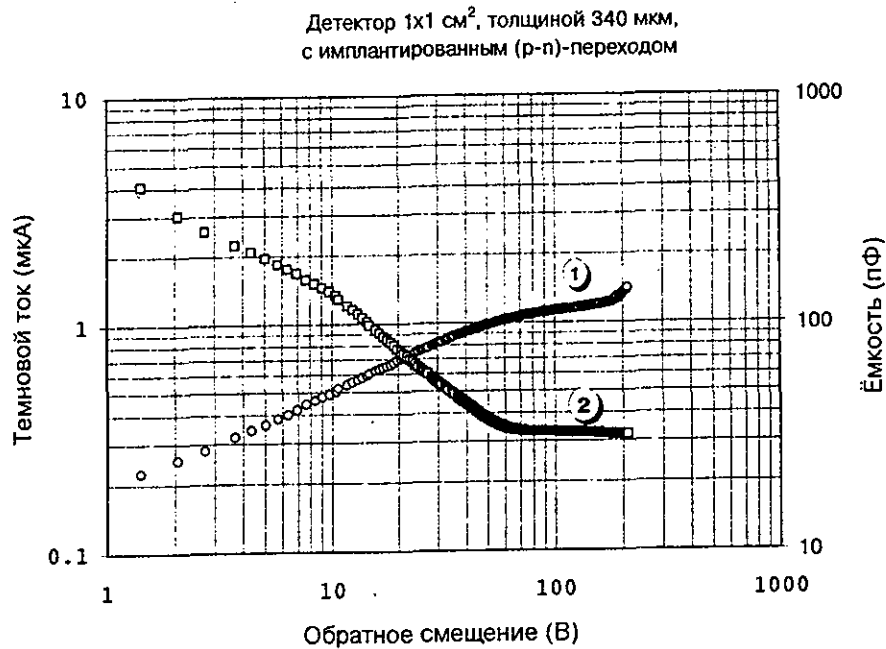


Рис.8. Вольт-амперная (1) и вольт-фарадная (2) характеристики детектора с имплантированным (p-n)-переходом

Для удобства отладки технологии использовались фотошаблоны, позволяющие на одной пластине диаметром 76 мм получать около 20 штук (pin) - фотодиодов размером 10x10 мм². Наличие на пластине 20 штук детекторов позволяет оценить повторяемость параметров по пластине, причины дефектов и однородность материала. На рис.8 легко определить напряжение полного обеднения по вольт-фарадной характеристике. Это напряжение соответствует геометрической ёмкости детектора и составляет около 65 В, что соответствует удельному сопротивлению исходного кремния более 6 кОм·см. Поведение и величина

темнового обратного тока детектора свидетельствует о том, что кроме объёмного тока утечки, определяемом исходными параметрами кремния, присутствуют и другие составляющие (поверхностный ток и ток, вызванный другими источниками дефектов). Для определения степени ухудшения исходных параметров в объёме кремния после проведения высокотемпературных процессов планарной технологии были изготовлены детекторы с имплантированным переходом и детекторы с поверхностным барьером Au-Si из пластин, принадлежащих одному слитку кремния.

Поверхностно-барьерные детекторы изготавливались без использования высокотемпературных операций и объёмные свойства материала у них не должны были меняться.

На рис.9 приведены I-V и C-V характеристики таких поверхностно-барьерных приборов. Токи утечки, приведенные к единице объёма детектора, оказываются сравнимы, а значит, при высокотемпературных операциях параметры объёма кремния не ухудшаются, и технологические операции проводятся относительно "чисто", без попадания в объём детектора быстро-диффундирующих примесей.

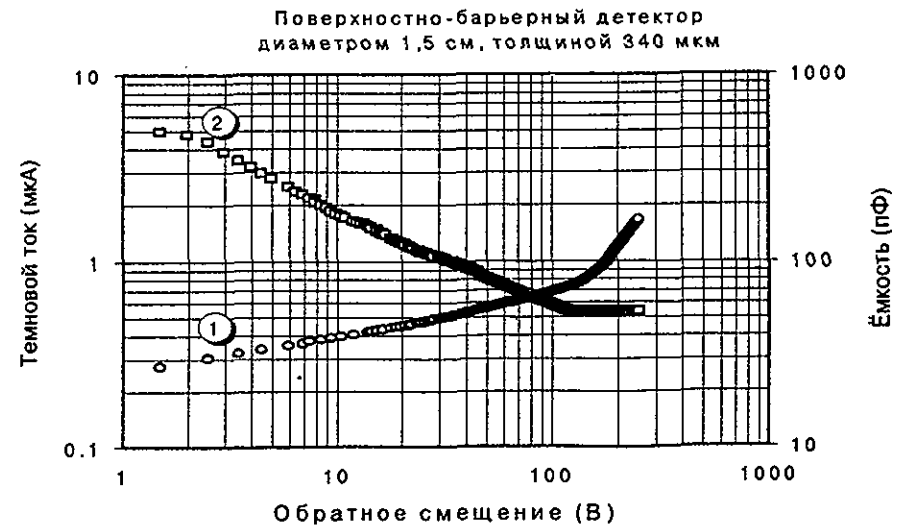


Рис.9. Вольт-амперная (1) и вольт-фарадная (2) характеристики поверхностно-барьерного детектора

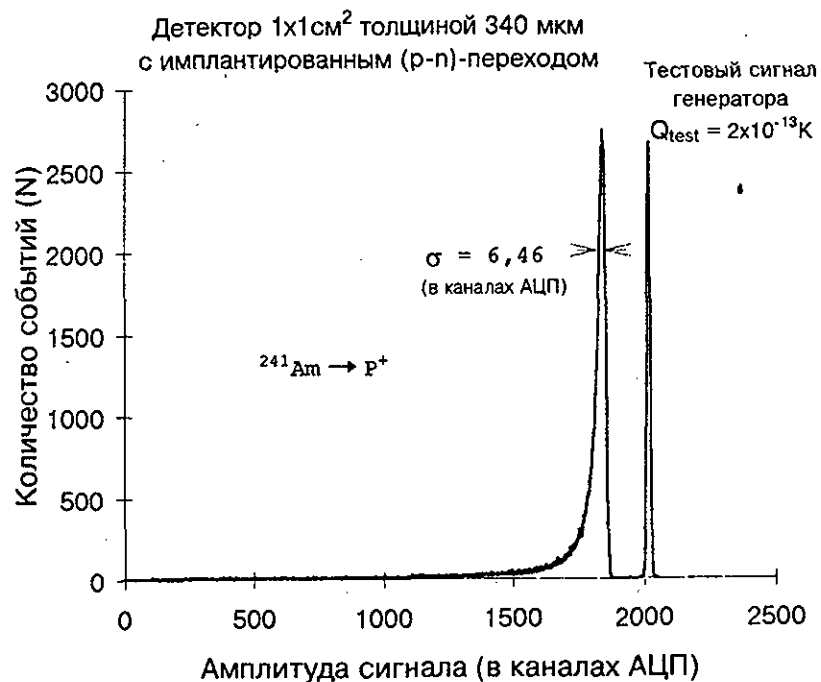


Рис.10. Спектр α -источника ^{241}Am ($E_{\alpha}=5,4858 \text{ МэВ}$), измеренного детектором с имплантированным переходом

Разница в величинах напряжения полного обеднения для детектора с имплантированным (p-n)-переходом и поверхностно-барьерного детектора объясняется тем, что детекторы были изготовлены на пластинах кремния с различным исходным удельным сопротивлением.

На рис.10 приведен спектр α -источника ^{241}Am ($E_{\alpha}=5,4858 \text{ МэВ}$), измеренного детектором с имплантированным переходом. Измерения проводились при напряжении $U_d=50 \text{ В}$, размеры детектора $10 \times 10 \times 0,3 \text{ мм}^3$, время формирования (сбора заряда) формирующего усилителя равнялось 500 нс . Детектор облучался α -частицами со стороны p^+ -контакта, источник размером $3 \times 3 \text{ мм}^2$ ставился непосредственно на поверхность детектора. Шум

электроники при подключенном детекторе измерялся по реперному пику, основной вклад в шум электроники давал довольно большой обратный ток детектора ($0,8 \text{ мкА}/50 \text{ В}$). Собственное энергетическое разрешение детектора равняется 30 кэВ . Первые изготовленные образцы планарных детекторов могут работать как детекторы сильноионизирующих частиц с неплохим разрешением, они менее чувствительны к условиям эксплуатации (вакуум, влажность), чем поверхностно-барьерные детекторы.

Выводы

1. В лабораторном корпусе ЛСВЭ создана "чистая зона" с классом чистоты 100 и площадью 75 м^2 .
2. Размещенное в "чистой зоне" оборудование позволяет изготавливать кремниевые детекторы по планарной технологии.
3. Изготовлены опытные образцы кремниевых детекторов с имплантированными переходами на высокоомном кремнии и измерены их характеристики, продолжаются исследования с целью улучшения параметров детекторов (снижение темнового тока).
4. Первые опытные детекторы показали, что они могут быть использованы как детекторы для сильно-ионизирующих частиц (α -частицы, ядра, ионы).
5. Комплекс оборудования позволяет производить сборку и контроль параметров детекторов, включая следующие операции:

- резка готовых пластин с детекторами на отдельные детекторы алмазным резцом;
- присоединение тыловых контактов детекторов проводящей пастой на основе серебра;
- присоединение контактов детекторов алюминиевой проволокой с помощью установки для ультразвуковой разварки;
- герметизация контактов детекторов компаундом;
- контроль параметров детекторов - вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики, амплитудные спектры от радиоактивных источников.

В заключение авторы считают своим долгом выразить благодарность за полезные обсуждения и консультации следующим специалистам из электронной промышленности и научных центров СНГ, России и Словакии:

- | | |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| Ю.Ф. Козлову,
А.И. Сидорову | - НИИ МВ, г. Зеленоград. |
| А.Н. Могутову,
М.Н. Ляхову | - НИИВТ, г. Москва. |
| Г.И. Воронковой | - ГИРЕДМЕТ, г. Москва. |
| И.Ф. Червоному | - ЗТМК, г. Запорожье. |
| Б.А. Эйдельману,
В.В. Илларионову | - СИАПС, г. Зеленоград. |
| В.К. Еремину,
Е.М. Вербицкой | - ФТИ им. Иоффе, г. С-Петербург. |
| Л. Грубчину,
И. Бешше | - ИФЗ САН, г. Братислава. |

Литература

1. Golutvin I.A. et al. Radiation Hardness of Silicon Detectors for Collider Experiments, JINR Preprint E14-95-97, Dubna, 1995.
2. "Электронная промышленность", №7, 1986 г., стр. 29.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 января 1998 года.