

Н.С. Ковальчук, К.В. Домасевич, Я.А. Соловьев, Е.С. Ацецкая
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
Филиал «Транзистор», Минск, Беларусь

УПРАВЛЕНИЕ ЭФФЕКТОМ «ПОДНЯТИЯ ПОДЛОЖКИ» В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ СО СКРЫТЫМИ СЛОЯМИ

Введение

Эпитаксия – ориентированный рост одного кристалла на поверхности другого (подложки) – является одним из базовых процессов технологии полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС). А ее классический вариант – газофазная автоэпитаксия (или гомоэпитаксия) – уже достаточно хорошо изучен и наиболее широко применяется в производстве наряду с более прогрессивными, но на порядок более дорогими технологиями гетероэпитаксии, молекулярно-лучевой эпитаксии и другими.

Не смотря на то, что современная наука и технология давно «перешагнули» классический вариант водородного восстановления тетрахлорида кремния, в реалиях серийного производства полупроводниковых ИС остается достаточно «белых пятен». В частности, наряду с целенаправленным легированием при эпитаксии происходит также автолегирование – перенос примеси из сильнолегированного слоя в слаболегированный. Такой эффект ограничивает выращивание пленок с большой разницей удельного сопротивления эпитаксиального слоя (ЭС) – подложки, а также тонких пленок, из-за протяженного переходного слоя – «хвоста» профиля легирования. Основным механизмом автолегирования является диффузия примеси. Однако при осаждении слаболегированных слоев возможна также сублимация примеси из сильнолегированной подложки и её перенос через газовую фазу с последующим встраиванием в растущий слаболегированный слой [1]. Впоследствии, по мере прохождения технологического маршрута изготовления, из-за многократных термообработок в процессе формирования активных элементов ИС переходной слой становится сопоставим с номинальной толщиной ЭС и начинает оказывать сильное влияние на работу готового изделия. Эффект «поднятия подложки» усиливается при наличии сильнолегированных скрытых слоев, которые в данном случае выступают как дополнительные источники примеси диффундирующей в эпитаксиальный слой.

В данной работе представлены результаты исследования эффекта «поднятия подложки» в ЭС с двумя скрытыми слоями (СС), продемонстрировано влияние эффекта на параметры ИС на примере линейного стабилизатора напряжения КР1181ЕНХХ, проведено сравнение ЭС изготовленных на разных установках эпитаксиального наращивания «Эпиквар 121М» и «РЕ2061S».

1. Влияние эффекта «поднятия подложки» на электропараметры ИС

Биполярная технология предусматривает формирование активных элементов в объеме полупроводниковой подложки с большим удельным сопротивлением ρ , определяющим высокое напряжение пробоя коллектор – база $U_{кб}$. С другой стороны, высокие значения ρ приводят к увеличению рассеиваемой в полупроводниковой подложке мощности и уменьшению коэффициента усиления транзисторов на высоких частотах. Технология эпитаксиального наращивания высокоомных полупроводниковых слоев на низкоомной подложке изначально и была придумана для разрешения этого противоречия. На рисунке 1 схематично изображена типовая структура, где используются низкоомные эпитаксиальные слои с противоположным относительно подложки типом проводимости. Образующийся при этом p-n переход служит для электрической изоляции соседних транзисторов, а сильнолегированный n⁺ диффузионный слой используется в качестве коллекторного контакта.

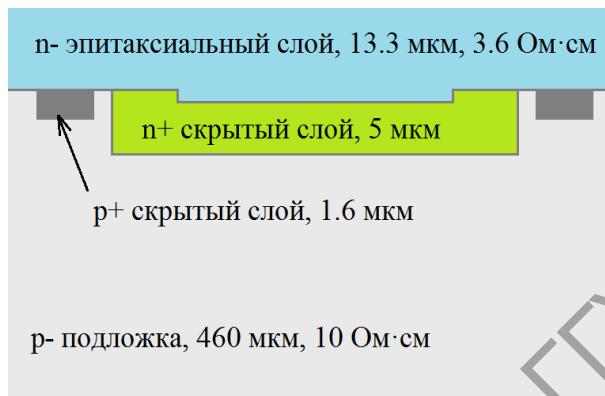


Рисунок 1 – Схематичное изображение ЭС с двумя СС

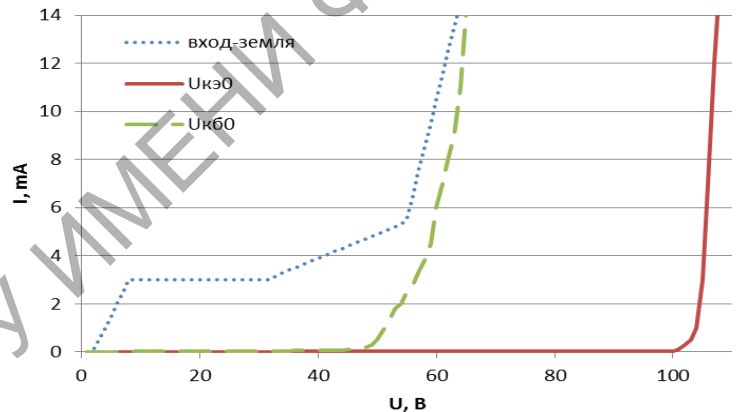


Рисунок 2 – Типовые ВАХ КР1181ЕНХХ

На рисунке 2 изображены типовые вольт-амперные характеристики (ВАХ) ИС КР1181ЕНХХ и отдельных её элементов. Пунктирной линией обозначена ВАХ «вход-земля», на которой отчетливо прослеживаются режимы эксплуатации изделия, в которых изготовитель гарантирует соблюдение номиналов выходных параметров: контролируемая стабилизация выходного напряжения при изменении входного с 8 до 20 В, предельное эксплуатационное входное напряжение 30 В [2]. Сплошной линией на рисунке 2 показана типовая ВАХ обратносмещенного p-n-перехода база-коллектор тестового технологического p-p-n-транзистора, эквивалентного по своим параметрам рабочим транзисторам, на которых основана ИС; штриховой – пробивное напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ0}$.

По мере уменьшения эффективной толщины ЭС за счет «поднятия подложки» начинает уменьшаться пробивное напряжение коллектор-база $U_{кб0}$.

После того как $U_{КБ0}$ становится равным $U_{КЭ0}$ можно говорить о максимальном сближении областей пространственного заряда эмиттерного и коллекторных р-п-переходов вплоть до их полного перекрытия. Дальнейшее уменьшение $U_{КБ0}$ уже идет совместно с $U_{КЭ0}$ и приводит уже к изменению ВАХ «вход-земля» выходом за пределы установленных норм на приемо-сдаточных параметров ИС. На рисунке 3 представлены ВАХ КР1181ЕНХХ с сильным «поднятием подложки». В рамках проведенных исследований наблюдалось снижение $U_{КБ0}$ и соответственно $U_{КЭ0}$, $U_{ВХ-З}$ до 15 В.

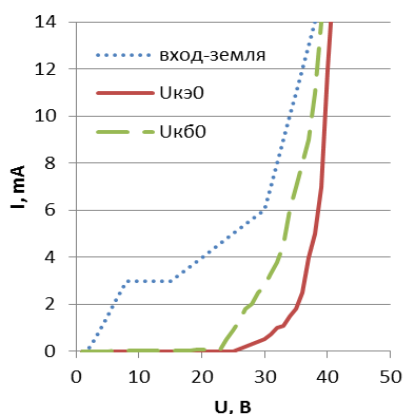


Рисунок 3 – ВАХ КР1181ЕНХХ с сильным «поднятием подложки»

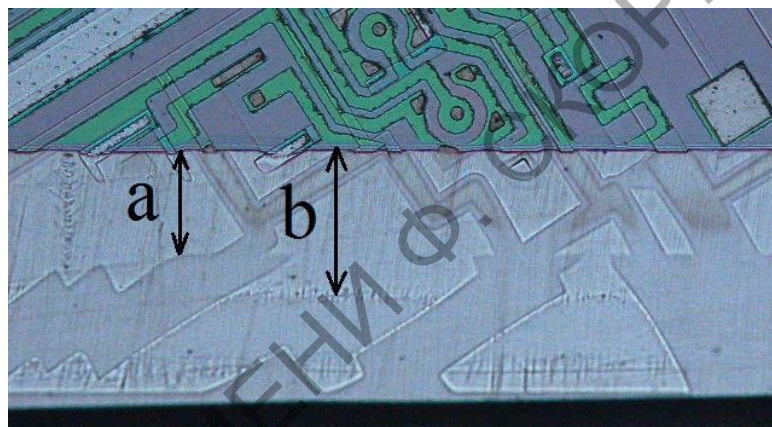


Рисунок 4 – Фрагмент косошлифа КР1181ЕНХХ с сильным «поднятием подложки»

Помимо оценки ВАХ в настоящей работе проводились исследования структур ИС путем изготовления косых шлифов и их декорированием в травителе Райта [3]. Измерение глубин залегания примесей осуществлялось с помощью интерферометра МИИ-4. Фрагмент проявленного шлифа, соответствующий случаю на рисунке 3, изображен на рисунке 4, где b – толщина ЭС до p-СС, a – толщина ЭС до подложки. Величина «поднятия» в данном конкретном примере составила 3,9 мкм.

2. Управление эффектом «поднятия подложки»

В рамках существующего и постоянно действующего технологического процесса изготовления эпитаксиальных структур и кристалльного производства ОАО «Интеграл» авторами проводился эксперимент по изготовлению линейных стабилизаторов напряжения КР1181ЕН05 с варьированием режимов выращивания ЭС – уменьшение температуры процесса первые 1...2 мкм роста; увеличение концентрации легирующей примеси в ЭС в 3...5 раз первые 1...2 мкм роста; увеличение номинала удельного сопротивления ЭС на 0,5 Ом·см. Каждый из вариантов изготавливался на установках ЭС «Эпиквар 121М» и «РЕ2061S» и сравнивался с текущими изделиями. Замеры глубин проводились по описанной

выше методике сразу после выращивания ЭС и после каждой последующей высокотемпературной операции. На рисунке 5 приведены обобщенные данные по результатам замера толщины ЭС до подложки на разных этапах производства кристаллов. На графике хорошо показаны предпосылки настоящего исследования – при переходе на новые установки эпитаксиального наращивания с «Эпиквар 121М» на «PE2061S» ЭС ведут себя иначе по мере прохождения пластин по маршруту изготовления.

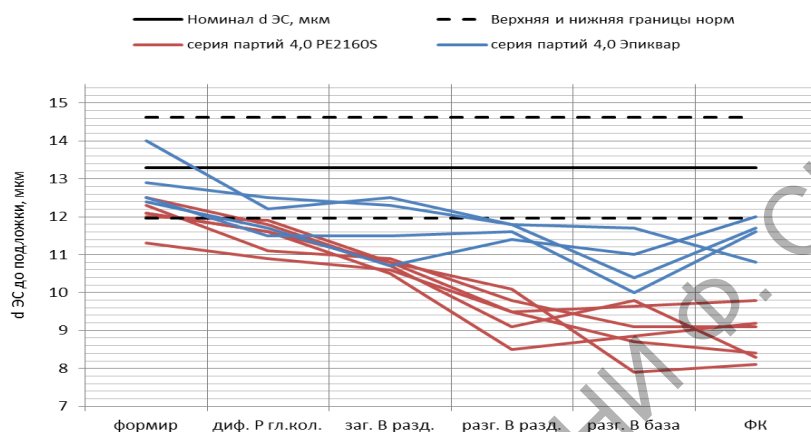


Рисунок 5 – Результаты замера толщины ЭС до подложки на разных этапах маршрута изготовления в сравнении установок «Эпиквар 121М» на «PE2061S»

Причина такого различия в настоящий момент все ещё уточняется. Тем не менее, были предложены и реализованы методы борьбы с таким расхождением, не дожидаясь итоговых результатов внутрипроизводственного анализа.

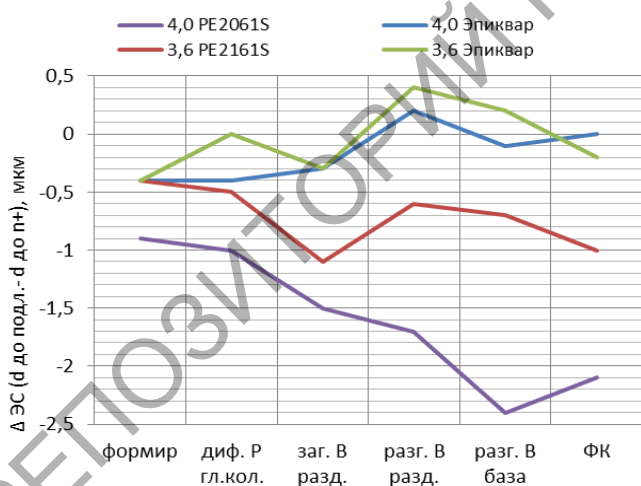


Рисунок 6 – Влияние увеличения $\rho^{\text{ЭС}}$ на эффект «поднятия подложки»

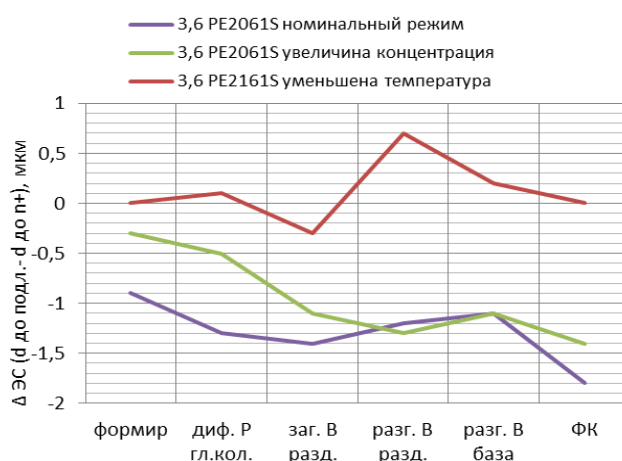


Рисунок 7 – Влияние изменения режимов наращивания ЭС на эффект «поднятия подложки»

На рисунках 6 и 7 представлены результаты проведенных экспериментов, при этом оценивалась непосредственно величина «поднятия подложки» – $\Delta^{\text{ЭС}}$.

Заключение

По результатам эксперимента установлено, что увеличение номинала удельного сопротивления ЭС хоть и увеличивает начальное значения $U_{\text{КБО}}$, но усиливает эффект «поднятия», что в конечном итоге приводит к тем же результатам – критично низкие пробивные напряжения в конце маршрута изготовления. Увеличение концентрации легирующей примеси в 3...5 раз первые 1...3 мкм уменьшает величину $\Delta^{\text{ЭС}}$, но существенно менее эффективно, чем уменьшение температуры роста первые 1...3 мкм.

Есть еще один способ управления эффектом «поднятия подложки» – увеличение площади n+ СС за счет уменьшения зазоров до p+ СС. Предполагается, что данный способ покажет не меньшую эффективность, но его реализация требует дополнительных финансовых вложений – на изготовления новых шаблонов для фотолитографии скрытых слоев.

Литература

1. Случинская, И.А. Основы материаловедения и технологии полупроводников / И.А. Случинская. – Москва : Мир, 2002. – 376 с.
2. КР1181 – серия стабилизаторов напряжения положительной полярности. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.transistor.by/i/pdf/kr1181.pdf>.
3. Жигулин, Д.В. Особенности исследований поперечных сечений субмикронных ИМС методом растровой электронной микроскопии / Д.В. Жигулин, М.В. Киросирова, А.А. Попкова // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 10-й междунар. науч. конф., БГУ, Минск 24–27 сентября 2013г. – 2013. – С. 352–353.

Я.А. Косенок, В.Е. Гайшун, О.И. Тюленкова

УО «Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины», Гомель, Беларусь

МОДИФИЦИРУЮЩАЯ ДОБАВКА В СВЯЗУЮЩЕЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Введение

Основные теплоизоляционные материалы, выпускаемые предприятиями в нашей республике – это пенополистирол и минераловатные утеплители.