

Издательство МИЭТ - 2015
ISBN 978-5-9256-0403-1
© Издательство МИЭТ, 2015

Издательство МИЭТ - 2015
ISBN 978-5-9256-0403-1
© Издательство МИЭТ, 2015

Электроника - 2015

Секция I

Международная научно-техническая конференция

(Зеленоград, 19 - 20 ноября 2015 г.)

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

УДК 621.38; 621.3.049.77; 620.3; 621.315.5

Э45

Э45 Электроника - 2015. Международная научно-техническая конференция:
тезисы докладов. - М.: МИЭТ, 2015. - 140 с.

ISBN 978-5-7256-0792-5

В материалах конференции представлены результаты научных исследований по следующим направлениям: «Функциональные материалы и структуры электроники», «Электронная компонентная база: проектирование, моделирование, технология», «Микро- и наносистемная техника», «Радиоэлектронные устройства и системы», «Биомедицинская инженерия».

Программный комитет конференции

Ю.В. Гуляев, Г.Я. Красников, Ю.А. Чаплыгин - сопредседатели;
Ж.И. Алферов, В.А. Бархоткин, В.А. Беспалов, А.С. Бугаев, В.А. Быков,
В.Д. Вернер, А.А. Горбацевич, А.В. Зверев, И.А. Каляев, В.А. Лабунов,
П.П. Мальцев, В.Ш. Меликян, А.А. Орликовский, В.Я. Панченко, К.О. Петросянц,
А.Н. Сауров, А.С. Сигов, А.Л. Стемпковский, Р.А. Сурис, Ю.М. Таиров,
А.М. Филачев, Е.В. Юртов

Тезисы докладов печатаются в авторской редакции

ISBN 978-5-7256-0792-5

©МИЭТ, 2015

Исследование технологичности методов газофазной гетероэпитаксии кремния на сапфире

С.Д. Федотов, А.В. Емельянов, С.П. Тимошенков

Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»,
e-mail: fedotov.s.d@yandex.ru

Гетероэпитаксиальные структуры кремния на сапфире (КНС) известны уже более 50 лет, однако до сих пор остаются востребованными среди семейства технологий кремний на изоляторе (КНИ). Структуры КНС в основном применяются как основа радиационно-стойких СБИС, а также для широкого перечня высокочастотных устройств. Элементы ИС на структурах КНС отличаются малыми потерями мощности и более высокой собственной частотой по сравнению с аналогами на объемном кремнии. Тем не менее, электрические свойства структур КНС значительно зависят от напряжений в решетке кремния, ориентационной неоднородности гетероэпитаксиального слоя и дефектного переходного слоя вблизи интерфейса кремний-сапфир.

Газофазная эпитаксия (ГФЭ) является первой технологией получения структур КНС и доминирующей промышленной технологией изготовления. Использование хлорсодержащих реагентов (SiCl_4 , SiHCl_3) в гетероэпитаксии КНС недопустимо, вследствие сильной эрозии поверхности сапфировой подложки. Синтез кремния в основном проводят, используя реакцию пиролитического разложения тетрагидрида кремния (моносилана, SiH_4). Гидридный метод эпитаксии КНС заключается в осаждении моносилана на подложку сапфира, нагретую до $800 - 1000^\circ\text{C}$, в атмосфере сухого водорода или инертного газа. Использование моносилана, за счет высокой плотности зародышевых островков кремния на начальной стадии роста, позволяет снизить влияние автолегирования из подложки и получить более совершенный переходный слой. Однако применение гидридного метода приводит к быстрому зарастанию внутренних поверхностей кварцевого реактора, вследствие образования продуктов побочных реакций (полисиланов), сопровождающих пиролиз SiH_4 . Полисиланы, кристаллизируются на стенках реактора с образованием твердых частиц, которые способны переносится конвекционным потоком в объем растущего слоя КНС. Гидридно-хлоридный метод, заключается в одновременной подаче SiH_4 и SiCl_4 , вследствие чего подавляется побочная реакция, сопровождающая пиролиз. Альтернативой приведенных выше методик, является комбинированный метод, в котором формирование переходного слоя кремний-сапфир происходит из чистого моносилана, а по достижению толщины слоя порядка $0,1 - 0,2 \text{ мкм}$, в реактор подают дополнительный поток HCl .

Целью настоящей работы являлось определение наиболее технологичного метода ГФЭ КНС, путем сравнения известных методов по изменению качества получаемых эпитаксиальных слоев кремния на сапфире в течение одного рабочего цикла.

Гетероэпитаксиальные слои КНС толщиной 600 нм были осаждены по гидридному, гидридно-хлоридному и комбинированному методу на подложки сапфира $\varnothing 100 \text{ мм}$ [1012] с помощью вертикального эпитаксиального реактора PE2061 фирмы «LPE»

(Италия). Расчетное удельное сопротивление 10 Ом·см, легирующая примесь - фосфин. Рабочая атмосфера - осущененный водород. По каждому методу ГФЭ проводился 1 рабочий цикл (5 опытных процессов). После каждого рабочего цикла проводился процесс травления реактора с помощью хлороводорода и маскирование подложкодержателя поликремнием. В реакторе поддерживалось слабое разряжение (не более 10 мбар). Производился отжиг сапфировых подложек в H_2 при ~ 1200 °С. Температура контролировалась цифровым оптическим пирометром. Скорость роста составила 400 - 450 нм/мин. Температура осаждения варьировалась в диапазоне 950 - 990 °С.

Методы контроля: толщина - ИК-Фурье спектроскопия отражения, уд. сопр. - четырехзондовый метод, состояние поверхности кремниевого слоя - УФ рассеяние и АСМ, рентгеноструктурный анализ (РСА) объема эпитаксиального слоя, качество переходного слоя кремний-сапфир - метод фото-ЭДС.

Толщина слоя составила 600 - 615 нм, $\pm 8\%$ по площади. Удельное сопротивление 10 - 12 Ом·см, $\pm 10\%$ по площади. В течение рабочего цикла степень УФ рассеяния и среднеквадратичная шероховатость (R_{ms}) на структурах, изготовленных гидридным методом, растет (1,8 - 2,11 ppm и 2,39 - 2,52 нм), гидридно-хлоридным методом - растет незначительно (0,48-0,53 ppm и 1,94 - 1,99 нм), комбинированным методом - практически не изменяется (0,3-0,33 ppm и 1,37-1,4 нм). На поверхности структур, изготовленных гидридно-хлоридным методом замечены локальные краевые области высокой матовости. РСА показал, что для гидридного метода присутствует незначительное уширение пика кривой качания с увеличением числа процессов в цикле. В целом, полученные слои имели высокое структурное совершенство: среднее значение полной ширины на полувысоте кривых качания для структур КНС, изготовленных гидридным методом составило $0,35^\circ$, гидридно-хлоридным - $0,31^\circ$ и комбинированным - $0,30^\circ$. Найдена тенденция роста показателя фото-ЭДС в течение рабочего цикла для гидридного (199 - 255 мВ) и гидридно-хлоридного метода (235 - 265 мВ). Стоит отметить, что максимально допустимая величина показателя фото-ЭДС равна 450 мВ.

Экспериментально подтверждено влияние твердых частиц полисиланов на процесс формирования эпитаксиального слоя при использовании гидридного метода: в течение рабочего цикла качество поверхности и переходного слоя кремний-сапфир ухудшалось.

Установлено, что отсутствие хлоридов в процессе ГФЭ КНС приводит к аккумуляции твердых частиц полисиланов и ухудшению качества эпитаксиальных слоев в течение рабочего цикла изготовления.

Обнаружено, что одновременная подача SiH_4 и $SiCl_4$ приводит к краевым локальным зонам матовости эпитаксиального слоя КНС, что скорее всего связано с неравномерным распределением в начальный момент роста концентрации гидрида и хлорида по площади подложки.

Определено, что комбинированный метод является самым технологичным методом ГФЭ КНС, т.к. позволяет получать структуры КНС высокого и однородного качества в течение всего рабочего цикла изготовления.

*Авторы выражают благодарность генеральному директору АО «ЭПИЭЛ»
Стациенко В.Н. за предоставленное эпитаксиальное оборудование.*