

СТРУКТУРНЫЕ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТОНКИХ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ПЛЕНОК ПОСЛЕ ИМПЛАНТАЦИИ B^+ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО ОТЖИГА

П. И. Гайдук¹, С. Н. Гринько¹, В. А. Зайков¹,
А. Г. Новиков¹, О. Ю. Наливайко², Е. Н. Пшеничный²

¹Белорусский государственный университет, zaikov@bsu.by

²УП «Завод полупроводниковых приборов», maito: dzsto3@integral.by

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время структурные и электрофизические свойства тонких поликристаллических $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ пленок мало исследованы по отношению к таким базовым технологическим процессам, как химическое осаждение из газовой фазы (CVD), ионная имплантация, постимплантационная равновесная термообработка, быстрый термический отжиг. Перспективность внедрения SiGe сплавов в технологию микроэлектроники вызывает огромный интерес исследователей к структурам со слоями $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ различного стехиометрического состава. Особый интерес представляет поведение атомов бора в поликристаллических слоях SiGe-сплавов. В настоящей работе приводятся результаты исследования структурно-фазового состава легированных бором слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, осажденных на термически выращенный оксид кремния, в процессе их равновесного термического отжига. Изучены зависимости слоевого сопротивления (R_s) от температуры отжига и степени легирования бором.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Осаждение поликристаллических $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ пленок проводилось в изотермической зоне горизонтального реактора пониженного давления с горячими стенками «Изонотрон 4-150». Температура осаждения варьировалась в диапазоне от 520 до 630 °С. Температурный профиль в изотермической зоне реактора поддерживался с точностью ± 1 °С. В экспериментах использовались 100 %-ный моносилан (SiH_4) и смесь, состоящая из 10 % моногермана и 90 % водорода (GeH_4 -10 % / H_2 -90 %). Давление в реакторе в процессе осаждения поддерживалось равным 30 ± 2 Па. Стехиометрический состав осаждаемых слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ определялся соотношением расходов $\text{GeH}_4/\text{SiH}_4$, которое изменялось от 0 до 0.014.

В качестве подложек использовались пластины кремния марки КДБ-10 с ориентацией (001). Перед осаждением пластины окислялись в установке термического окисления «Оксид-3 РО» в атмосфере сухого кислорода при температуре 1000 °С. Толщина сформированного окисла для всех пластин равнялась 165 нм. В результате CVD осаждения были сформированы структуры $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x/\text{SiO}_2/\text{Si}$ различного стехиометрического состава: $x = 0$, $x = 0.09$ и $x = 0.3$.

Легирование полученных структур проводилось ионами бора B^+ с энергией 60 кЭв. Дозы легирования выбирались следующим образом: $D = 10^{13}$ ат/см²; $D = 10^{14}$ ат/см²; $D = 10^{15}$ ат/см²; $D = 10^{16}$ ат/см². Концентрационный максимум исходного профиля легирования был локализован на глубине 190-200 нм. Полученные структуры отжигались в атмосфере сухого азота в течение 10 мин в диапазоне температур от 500 до 1100 °С.

Исследования структурно-фазового состава образцов проводились методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и резерфордского обратного рассеяния (РОР). Измерения электрофизических свойств образцов после термического отжига выполнялись четырехзондовым методом. Химический состав слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и их толщину определяли методом РОР.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нами установлено, что в исследованном диапазоне температур от 520 до 620 °C с увеличением соотношения расходов $\text{GeH}_4/\text{SiH}_4$ скорость осаждения $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ пленок монотонно возрастает при всех температурах осаждения. Зависимости скорости осаждения от температуры для различных соотношений потоков $\text{GeH}_4/\text{SiH}_4$ близки к линейным. Увеличение расхода моногермана приводит к уменьшению энергии активации процесса осаждения с 59.6 до 40.1 кДж, что является причиной роста скорости осаждения слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. В результате процесса CVD осаждения были получены поликристаллические пленки $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ с содержанием германия от 9 до 30 ат. %, а также пленки поликремния.

Методом РОР были определены толщины (h) различных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, а также параметр стехиометричности x : для поли-Si – $h = 475$ нм; для $\text{Si}_{0.81}\text{Ge}_{0.09}$ – $h = 290$ нм; для $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ – $h = 655$ нм.

На рисунке 1 представлены микрофотографии структуры слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, полученных в различных условиях осаждения, легирования и отжига. На микрофотогра-

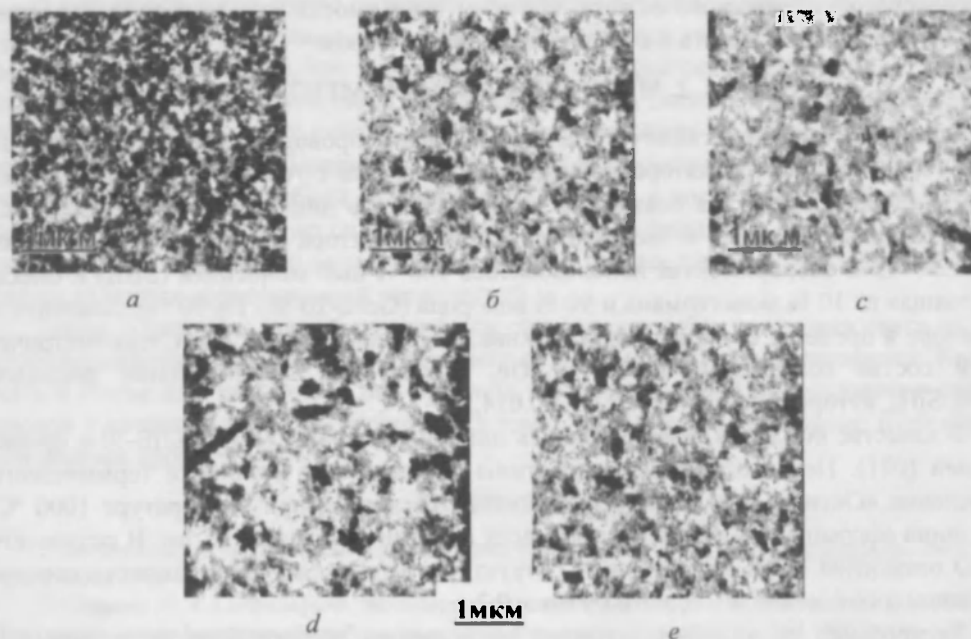


Рис. 1. ПЭМ изображения планарных сечений: а – поли-Si; б – $\text{Si}_{0.81}\text{Ge}_{0.09}$; в – $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$, легирование бором с дозой $D = 10^{15}$ ат/см², отжиг при 1000 °C в течение 10 мин в сухом азоте; д – $\text{Si}_{0.81}\text{Ge}_{0.09}$ – нелегированный образец, е – $\text{Si}_{0.81}\text{Ge}_{0.09}$ – образец, легированный бором с дозой $D = 10^{15}$ ат/см², время отжига 10 мин, температура отжига 1000 °C в сухом азоте

фиях прослеживается тенденция увеличения размера зерна, как при повышении температуры отжига, так и при увеличении концентрации германия.

Однако в легированных бором слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ размер зерна растет значительно медленнее по сравнению с нелегированными структурами. Средний размер зерен для пленок $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, полученных при температурах осаждения 520–570 °С и толщине около 200 нм, составляет от 15 до 20 нм, что сопоставимо со средним размером зерен пленок нелегированного поликристаллического кремния (20–22 нм), имеющих аналогичную толщину.

В легированном слое $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ скорость роста кристаллита зависит от концентрации легирующей примеси. Легирующая примесь увеличивает концентрацию вакансий, а следовательно, скорость миграции, что ведет к увеличению скорости роста кристаллита. С другой стороны, примеси могут и замедлять миграцию границы кристаллита вследствие сегрегации и образования кластеров [1]. Можно предположить, что для поликристаллических $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ слоев, полученных методом CVD и легированных бором, имеет место сегрегация легирующей примеси на границах зерен.

Электрофизические измерения показали, что существенная активация имплантированного бора происходит при дозах легирования выше $D = 10^{14}$ ат/см². На рис. 2 приведена зависимость слоевого сопротивления от температуры отжига. Из рисунка следует, что в интервале температур отжига от 500 до 800 °С слоевое сопротивление всех образцов уменьшается при увеличении температуры отжига. Причем основная активация примеси бора, характеризуемая резким уменьшением слоевого сопротивления, происходит в диапазоне температур от 500 до 600 °С.

Оценки удельного сопротивления образцов, подвергнутых отжигу при температуре 600 °С, дают следующие значения: для поли-Si и $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ при дозе легирования $D = 10^{14}$ ат/см² удельные сопротивления соответственно равны – 840 мОм·см и 290 мОм·см, а при дозе легирования $D = 10^{15}$ ат/см² удельным сопротивлениям соответствуют значения – 23 мОм·см и 10.2 мОм·см. Эти данные хорошо согласуются с результатами, полученными авторами работ [2, 3].

Для образцов поли-Si и $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ на фоне уменьшения слоевого сопротивления при увеличении температуры отжига наблюдаются также «пики» – области с отрицательным ходом слоевого сопротивления. «Пики» слоевого сопротивления в диапазоне температур от 900 до 1000 °С присутствуют для всех образцов с дозой легирования $D = 10^{15}$ ат/см² и для $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$ с дозой легирования $D = 10^{14}$ ат/см².

Аналогичное поведение слоевого сопротивления для имплантированных поли-Si- $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ пленок наблюдали авторы работы [4]. Отрицательный ход зависимости слоевого сопротивления от температуры коррелирует с увеличением размера

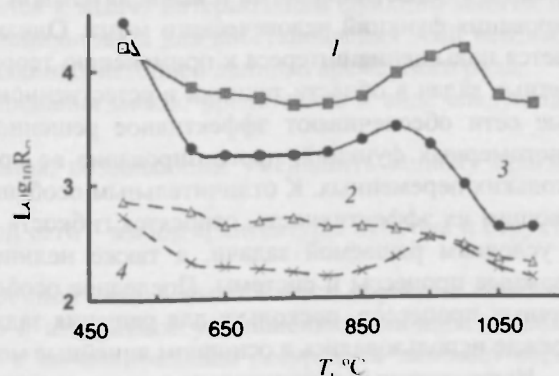


Рис. 2. Зависимость слоевого сопротивления R_s от температуры отжига: зависимости 1 и 2 – поли-Si, зависимости 3 и 4 – $\text{Si}_{0.7}\text{Ge}_{0.3}$; доза легирования: для зависимостей 1 и 3 – $D = 10^{15}$ ат/см², для зависимостей 2 и 4 – $D = 10^{14}$ ат/см², энергия ионов бора B^+ – 60 кэВ

зерна в слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (рис. 1) при отжиге в диапазоне температур от 900 до 1000 °С.

Удельное сопротивление SiGe сплавов определяется, в первую очередь, рассеянием на границах кристаллита, туннелированием через энергетический барьер на границе каждого кристаллита, что приводит к уменьшению подвижности. Другим фактором, приводящим к снижению удельного сопротивления, является сегрегация примеси, которая может происходить как на границе раздела, так и на границах кристаллита, что приводит к обеднению активной примеси [1]. Для выяснения физических особенностей активации примеси бора в слоях $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ необходимы дополнительные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антонетти. М.: Радио и связь, 1988. 495 с.
2. Watakabe Hajime, Sameshima Toshiyuki. // Thin Solid Films. 2006. Vol. 508. P. 315–317.
3. Jin Zhonghe, Guraraj Bhat A. Yeung Milton W.Y. // IEEE Transaction on Electron Devices. 1997. Vol. 44. P. 1958–1964.
4. Chen Kun-Ming, Huang Guo-Wei, Chiu D. Y. // Applied Physics Letters. 2002. Vol. 81. P. 2578–2580.

НЕЙРОСЕТЕВАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭПР-ИССЛЕДОВАНИЙ ПОРОШКОВ СИНТЕТИЧЕСКИХ АЛМАЗОВ

И. И. Азарко, Е. И. Козлова, Д. П. Макуцня, П. В. Толстых

Белорусский государственный университет

Теория нейронных сетей возникла несколько десятилетий назад на стыке исследований в области биологии и вычислительной техники в результате попыток моделирования функций человеческого мозга. Однако только в последнее время наблюдается повышение интереса к применению теории нейронных сетей к решению различных задач в области техники и естественнонаучного эксперимента. Так, нейронные сети обеспечивают эффективное решение задач нелинейной аппроксимации многомерных функций, прогнозирование во времени процессов, зависящих от нескольких переменных. К отличительным особенностям нейронных сетей, обуславливающим их эффективность, относятся гибкость и способность легко адаптироваться к условиям решаемой задачи, а также нелинейность, позволяющая имитировать сложные процессы и системы. Последнее особенно важно при моделировании различных процессов, поскольку для решения задач моделирования и анализа данных прежде использовались в основном линейные модели и методы.

Искусственные нейронные сети – это совокупность моделей биологических нейронных сетей, представляющих собой сеть элементов – нейронов, связанных между собой синаптическими соединениями. Сеть обрабатывает входную информацию и в процессе изменения своего состояния во времени формирует совокупность выходных сигналов. Биологический нейрон – это сложная система, математическая модель которого до сих пор полностью не построена, тем не менее введено множество моделей, различающихся как сходством с реальным нейроном, так и вычислительной