

ВЗАМОДЕЙСТВИЕ ПРИМЕСНЫХ АТОМОВ Ni и Cu НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРЕМНЬЕВЫХ ДАТЧИКОВ

Нормуратов Кахрамон Тогаймуратович
старший преподаватель филиала Астраханского государственного технического
университета в Ташкентской области,

Аннотация: Определены проводимость и время жизни неравновесных носителей заряда примеси никеля в тензодатчиках из монокристаллического кремния. Установлен оптимальный режим протекания процесса диффузии. Показано, что генерация термодоноров подавляется взаимодействием примесей никеля и кислорода, вводимых при 500°C, и доказано это взаимодействие не влияет на образование высокотемпературных термодоноров, образующихся при 700°C.

Ключевые слова: кремний, химическое осаждение, диффузия никеля, удельное сопротивление, термообработка, тензодатчики, дефект, метод.

Применение Si:Ni в технологии вызывает большой интерес для использования его при изготовлении тензодатчиков. Широкое применение Ni в качестве легирующей примеси обосновывается как альтернатива дорогостоящему золоту при производстве быстродействующих высокочувствительных структур давления [1]. Существуют различные способы легирования никеля в кремний и одним из них является химическое осаждение. Преимущества этого метода заключается в использовании энергоресурсосберегающей технологии; отсутствии необходимости применять вакуумную технику; снижении себестоимости продукции.

Кроме этого, данный метод позволяет получить продукцию с новыми характеристиками: многослойная металлизация кремния с варьируемой природой слоев металлов. Важнейшая стадия технологии – химическое осаждение из водного гипофосфитного раствора пленок никеля с включением небольшого количества фосфора, обеспечивающих прочное сцепление с кремнием, электропроводность поверхности пластин и возможность дальнейшего химического, электрохимического или контактного осаждения из растворов пленок никеля.

Для придания каталитической активности поверхности кремния в реакции химического осаждения никеля используют как палладиевую, так и беспалладиевую активацию. При подготовке пластин к нанесению пленок металлов проводят операцию травления кремния. Технические характеристики растворов и условий проведения операций: для травления кремния используют скоростные щелочные растворы либо кислые, содержащие фторид-ионы; для активации перед химическим никелированием используют нанесение из раствора палладиевого катализатора или проводят беспалладиевую активацию; длительность операций нанесения каждого слоя металла или сплава не превышает 5...7 мин; все растворы пригодны для многократного использования. Рабочая температура растворов в зависимости от их назначения 18...98 °C; в ряде случаев между отдельными операциями не требуется промывка водой [2].

Другой способ легирования заключается в формировании силицидов никеля методом вжигания пленки никеля в поликремниевую пленку, нанесенную на окисленный монокристаллический кремний, то есть методом магнетронного распыления. Для получения требуемого образца диффузионным способом пластинка кремния сперва легируется фосфором, а затем в вакууме методом магнетронного распыления на поликремний напыляется пленка никеля (500...1200 Å) [3].

Для исследования электрофизических свойств тензодатчиков из монокристаллического кремния n- и p-типов проводимости, легированные примесью никеля методом диффузии использовали эффект Холла, в котором проводимости выполнялись по стандартной методике в режиме постоянного электрического и магнитного полей. Оптические свойства образцов кремния, легированного никелем,

исследовались на спектральных приборах ближнего и среднего ИК-диапазона (0,75...25 мкм). В исследованиях использовали образцы монокристаллического кремния с плотностью дислокации $5 \cdot 10^{13} \dots 10^{15} \text{ см}^{-3}$ с исходной концентрацией примесей фосфора. Концентрация оптически активного кислорода в этих образцах составляла $(1 \dots 8) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, а углерода $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Никель вводился методом диффузии при температурах 1100...1250°C.

При этом исследовали влияние температуры диффузии и низкотемпературной обработки на спектр поглощения при комнатной и азотной температурах. Дифференциальный спектр поглощения снимался относительно отожженных контрольных образцов кремния без никеля. При этом особое внимание уделялось плоскопараллельности и полировке образцов. Толщина образцов составляла в пределах 1,5...4 мм. Для выявления корреляции между концентрацией кислорода и никеля в кремнии диффузия проводилась при температурах 1000...1370°C, что позволило регулировать концентрацию вводимого никеля в интервале $10^{16} \dots 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Концентрация введенного никеля определялась активационным методом.

При диффузионном легировании никелем кристаллов с удельным сопротивлением $\rho = 10 \dots 100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ изменения электрофизических и оптических свойств образцов Si<Ni> при термическом отжиге установлено, что никель создает два акцепторных уровня с энергией $E_1 = E_v + 0,2 \text{ эВ}$ и $E_2 = E_c - 0,4 \text{ эВ}$ при концентрации введенного никеля $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. При этом атомы никеля находятся преимущественно в узлах кристаллической решетки в виде нейтральных атомов (Ni^0), одно- и двухзарядных ионов (Ni^+ , Ni^{2+}). Максимальная концентрация электроактивных атомов $N_{\text{Ni}} = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Электронейтральные атомы никеля ($\text{Ni}^0 - 3d^8 4s^2$, $\text{Ni} - 3d^5 4s^2 4p$, $\text{Ni}^{2+} - 3d^8 4s^2 3p^2$ перемещаясь по дислокациям, образуют комплексы с кислородом типа NiO_x , а также комплексы с другими дефектами. После поэтапной низкотемпературной диффузии никеля в объеме кремния образуются нанокластеры из атомов никеля, которые находятся в $3d^{10}$ - состоянии. Образование комплексов NiO_x нейтральными атомами никеля и нанокластеров из электроактивных атомов никеля в сильнокомпенсированном кремнии приводит к резкому повышению термостабильности характеристик за счет снижения концентрации термодфектов. Поскольку, концентрация электрически активных атомов этих примесей составляет $\sim 0,1\%$ от общей растворимости и не превышает 10^{14} см^{-3} , а в результате взаимодействия никеля с кислородом не образуются активные центры, то имеется реальная возможность использовать никель для получения термостабильных материалов. Для исследования влияния ТО на свойства некомпенсированного или слабо компенсированного кремния была проведена диффузия никеля в кремний р-типа с удельным сопротивлением $\rho = 10 \dots 40 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и n -типа с $\rho = 10 \dots 40 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. При этом температура диффузии выбиралась с таким расчетом, чтобы концентрация электрически активных атомов Ni была значительно меньше исходных мелких примесей, т.е. введение никеля не приводило к изменению параметров образца.

По данным холловских измерений, а также по спектрам ИК поглощения и рекомбинационного излучения центров, которые включают в свой состав атомы никеля, не было обнаружено. Полосы ФЛ при 0,861; 0,867 и 0,875 эВ ранее, согласно [4], связывавшиеся с дефектами, содержащими атомы Ni, проявлялись и в термообработанном нелегированном никелем материале и в кристаллах Si, содержащих примесь меди.

Из анализа результатов, полученных для высокочистого кремния после проведения на нем диффузии никеля, можно сформулировать следующие основные закономерности:

- увеличение удельного сопротивления материала наблюдается при повышении температуры диффузионного отжига, причем степень компенсации проявляет зависимость от аксиального расположения исследуемой пластины в слитке, определяющего содержание в ней основных фоновых технологических примесей (O, C и др.);
- уменьшение времени жизни неравновесных носителей заряда наблюдается при возрастании $T_{\text{диф}}$: при $T_{\text{диф}} > 960^\circ \text{C}$ τ снижалось в 2-3 раза, а наиболее заметное

уменьшение данного параметра до $\sim (2-3)$ мкс проявлялось при температурах, превышающих 1000°C .

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что диффузионное введение примеси никеля в кремний, может быть использовано в качестве компенсирующей для n-Si. Экспериментальные исследования показывают, что образцы с максимальной концентрацией электрически активных атомов, равномерно легированных со стабильными параметрами энергетических уровней примесей, удается получить при длительности отжига 1,5...2 часа в зависимости от температуры отжига ($1000\ldots 1350^{\circ}\text{C}$). Верхний температурный предел определяется эффективными превращениями в системе Si-Ni, приводящими к "утрате" приповерхностным слоем никеля генерирующих свойств относительно фоновых технологических примесей: нижним распадом пересыщенного твердого раствора Ni в кремнии, происходящем в температурном интервале $600\ldots 700^{\circ}\text{C}$.

Использованная литература

1. Насриддинов С.С., Маннанов М.И., Соатов А.Қ., Ибодуллаев Ш.Н. Си атомлари билан легирланган кремний асосида терморезисторлар яратишнинг физик ва технологик имкониятлари. ФарПИ илмий-техник журнали. 2022 й. Том 26 №1, 22-26 бетлар.
2. Nasriddinov S.S., Esbergenov D.M. Kinetics of formation of complex defects in silicon doped with zinc and nickel. European Science Review Scientific journal № 1–2 2022 (January – February) 40-45.
3. Насриддинов С.С., Маннанов М.И., Есбергенов Д.М., Турсунметова З.А. Термоанемометрический резистор на основе кремния, легированного медью. НТЖ ФерПИ. 2022. Т.26. В.3.
4. Насриддинов С.С., Есбергенов Д.М. Исследования комплексного дефектообразования в кремнии, легированном никелем. / Известия вузов. Физика. (SCOPUS)