

В таблице 1 отображены полученные значения $k_{тр}$ и K_c после наноскрепт-теста для многослойных покрытий TiN и AlN. Самые низкие значения коэффициента трения $0,45 \pm 0,13$ и вязкости разрушения $7,92 \pm 0,43 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ получены на покрытии TiN при нагрузке 1000 мкН, а самые низкие $k_{тр} = 0,57 \pm 0,32$ и $K_c = 0,11 \pm 0,02 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ – на покрытии AlN при нагрузке 100 мкН.

Таблица 1 – Трибологические свойства многослойных покрытий

Покрытие	Нагрузка, мкН	$k_{тр}$	$K_c, \text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$	$H, \text{ГПа}$	$H_s, \text{ГПа}$
Ti _{85,7} N _{14,3} /Ti _{55,6} N _{44,4} /Ti _{56,8} N _{43,2}	1000	$0,45 \pm 0,13$	$7,92 \pm 0,43$	10,05	10,07
	1500	$0,53 \pm 0,16$	$6,07 \pm 0,46$		
	2000	$0,49 \pm 0,16$	$8,53 \pm 0,60$		
Al _{87,1} N _{12,9} /Al _{82,8} N _{17,2} /Al _{93,7} N _{6,3}	50	$0,57 \pm 0,32$	$0,11 \pm 0,02$	0,9	1,04
	75	$0,65 \pm 0,30$	$0,23 \pm 0,04$		
	100	$0,63 \pm 0,27$	$0,16 \pm 0,03$		

Твердость при царапании H_s (ГПа) рассчитывается исходя из полученных значений ширины дорожки царапин w (м) на покрытии и сравнивается со средней твердостью H (ГПа), полученной в результате теста на вдавливание (индентирование) со схожей нагрузкой. Установлено, что твердость при царапании и типичная твердость многослойных покрытий TiN и более пластичных многослойных покрытий AlN имеет схожие значения, которые приведены в табл. 1.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта БРФФИ № T23РНФ-132.

Литература

1. Kumar, A. Improving tribological behavior of titanium nitride (TiN) hard coatings via zirconium (Zr) or vanadium (V) doping / A. Kumar, R.S. Mulik // Tribology International. – 2023. – Vol. 189. – P. 108997.
2. Lapitskaya, V. The influence of nitrogen flow on the stoichiometric composition, structure, mechanical and microtribological properties of TiN coatings / V. Lapitskaya, A. Nikolaev, A. Khabarava, E. Sadyrin, P. Antipov, K. Abdulvakhidov, S. Aizikovitch, S. Chizhik // Materials. – 2024. – Vol. 17, № 1. – P. 120.

УДК 537.3; 539.2

ТРАНСМУТАЦИОННО ЛЕГИРОВАННЫЙ КРЕМНИЙ

Студент гр. 11303124 Шовкиев А. С.

Кандидат физ.-мат. наук, доцент Черный В. В.

Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

Постоянная тенденция в развитии полупроводниковой электроники – все возрастающие требования к качеству полупроводниковых материалов. Для создания приборов, работающих при достаточно высоких обратных напряжениях (выпрямительные диоды, транзисторы), необходим кремний с высокой степенью однородности легирования донорной или акцепторной примесью. Традиционные методы легирования, такие как диффузия или ионная имплантация уже оказываются недостаточными для достижения указанной цели.

Наилучшей степени однородности распределения легирующей примеси удастся достичь, используя метод трансмутационного легирования [1–3]. Сущность метода заключается в следующем. Кремний, как известно, представляет собой смесь трех изотопов $^{28}_{14}\text{Si}$, $^{29}_{14}\text{Si}$, $^{30}_{14}\text{Si}$. При облучении тепловыми нейтронами во взаимодействие с ними активно вступает изотоп $^{30}_{14}\text{Si}$. В результате ядерной реакции $^{30}_{14}\text{Si} + {}^1_0n$ образуется нестабильный изотоп $^{31}_{14}\text{Si}$, который испытывает β^- -распад, превращаясь в стабильный изотоп фосфора $^{31}_{15}\text{P}$. Данный изотоп является донором.

Изотоп $^{30}_{14}\text{Si}$ распределен равномерно по объему кремния, что и обеспечивает высокую степень однородности легирования донорной примесью.

Облучение производится в канале ядерного реактора. При облучении образуются радиационные дефекты, в том числе из-за действия неминуемо присутствующих нейтронов более высоких энергий. Радиационные дефекты вносят в запрещенную зону кремния глубокие энергетические уровни, так что сразу после облучения кремний оказывается высокоомным материалом р-типа проводимости.

Для удаления радиационных дефектов производится отжиг при температурах 600–650 °С. В результате происходит конверсия в п-тип проводимости, и материал становится пригодным для последующих процессов по созданию полупроводниковых приборов.

В данной работе исследовались образцы кремния, подвергнутые процессу трансмутационного легирования. Исходные образцы были р-типа проводимости с удельным сопротивлением 100 Ом·см.

Сразу после облучения образцы, как и ранее отмечалось, оказались р-типа проводимости с удельным сопротивлением более 1000 Ом·см. В спектрах инфракрасного поглощения проявлялись известные полосы радиационных дефектов в кремнии 3,6 мкм, 1,8 мкм, а также полоса однофононного поглощения 20,5 мкм и монотонно растущее по интенсивности с ростом энергии фотона поглощение вблизи края полосы фундаментального поглощения.

Произведенный отжиг в течение 30 минут при 650 °С привел к исчезновению всех особенностей физических свойств, обусловленных радиационными дефектами. Материал конвертировал в п-тип проводимости. В спектрах инфракрасного поглощения проявлялось поглощение на свободных носителях – электронах.

Проведенные измерения эффекта Холла показали, что концентрация введенного фосфора линейно связана с использованными флюенсами облучения тепловыми нейтронами. Подвижность электронов соответствовала значениям, характерным, как это следует из известных литературных источников, для достигнутых концентраций.

Литература

1. Вопросы радиационной технологии полупроводников. – Новосибирск: Наука, 1980. – 296 с.
2. Вавилов, В. С. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах // В. С. Вавилов, Н. А. Ухин. – М.: Атомиздат, 1969. – 632 с.
3. Физические процессы в облученных полупроводниках / Под редакцией Л. С. Смирнова. – Новосибирск: Наука, 1977. – 256 с.