

СТРУКТУРА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СИСТЕМЫ «НИКЕЛЬ-КРЕМНИЙ», ПОДВЕРЖЕННОЙ ВОЗДЕЙСТВИЮ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Ю.А. Петухов¹⁾, Н.Т. Квасов²⁾, Ю.Г. Шедко²⁾

¹⁾ Белорусский Государственный Университет

220080, пр. Независимости, 4а, Минск, Беларусь, Тел. +375 17 2095512, e-mail: uglov@bsu.by

²⁾ Белорусский Государственный Университет Информатики и Радиоэлектроники,
220013, ул. П. Бровки, 6, Минск, Беларусь, Тел. +375 17 2938613, e-mail: kvasov@bsuir.unibel.by

Исследовано влияние воздействия компрессионных плазменных потоков на элементный, фазовый состав, а также микроструктуру системы «никелевое покрытие—кремниевая подложка». Покрытие толщиной 4 мкм наносилось на монокристаллические пластины кремния (ориентации (100) и (111)). Плотность энергии, передаваемой плазменным потоком, составляла 8–15 Дж/см², а продолжительность воздействия ~100 мкс. Показано, что обработка компрессионной плазмы приводит к перераспределению компонент покрытия и подложки, образованию силицидов никеля и формированию дендритной структуры.

Введение

Воздействие компрессионных плазменных потоков на систему «металлическое покрытие—полупроводниковая подложка» представляет значительный научный и практический интерес с точки зрения формирования новых структурно-фазовых состояний в приповерхностных слоях [1, 2]. Особенности этих состояний в значительной степени определяется величиной поглощенной энергии и длительностью воздействия. Изучение влияния данных факторов на фазообразование является актуальной задачей физического материаловедения.

Методика эксперимента

В качестве объекта исследования использовалась монокристаллическая пластинка кремния (кристаллографические ориентации (100) и (111)) размером 10х10 мм. Покрытие никеля толщиной 4 мкм наносилось методом безэлектролизного химического осаждения.

Обработка компрессионными плазменными потоками производилась в магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии в режиме «костаточного газа». В качестве плазмообразующего вещества использовались азот и водород (давление ~400 Па). Продолжительность импульса составляла ~100 мкс, концентрация электронов плазмы ~10¹⁷ см⁻³, давление потока — 1,5 МПа, температура — 3 эВ. Расстояние между мишенью и катодом магнитоплазменного компрессора составляло 12 см, а начальное напряжение на конденсаторной батарее — 3,2 кВ. Согласно данным калориметрических измерений [3], плотность энергии в случае воздействия плазмой азота составляла 8 Дж/см², в случае водорода — 15 Дж/см².

Микроструктура обработанной системы, а также распределение элементов по поверхности и по глубине изучались методами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа на микроскопе LEO1455VP фирмы "Karl Zeiss" с энергодисперсионным рентгеноспектральным микроанализатором Rontec.

Фазовый состав обработанной системы никель-кремний исследовался методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-4-13

при фокусировке по Брэггу-Брентано в излучении Cu Kα.

Результаты и обсуждение

Исследования методами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа показали, что микрорельеф обработанных образцов характерен для быстрозатвердевшей жидкости. Также было выявлено перераспределение компонент покрытия и подложки в приповерхностном слое толщиной 10–15 мкм (рис. 1). Таким образом, высокоэнергетическое воздействие компрессионного плазменного потока приводит к расплавлению покрытия никеля и части кремниевой подложки, их жидкофазному перемешиванию и последующей кристаллизации за счёт теплопроводности подложки.

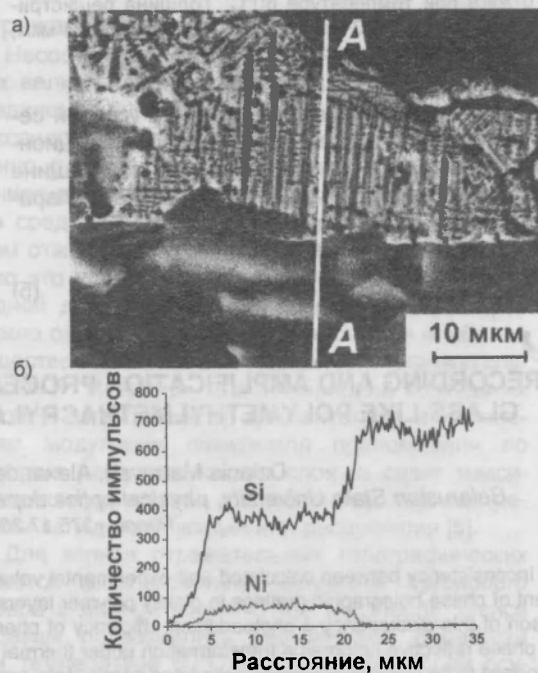


Рис. 1. Микрофотография поперечного сечения (а) и распределения интенсивностей характеристических рентгеновских излучений кремния и никеля вдоль линии AA (б) системы Ni/Si(100), обработанной импульсом плазмы азота

Фазовый анализ выявил формирование силицидов никеля NiSi , NiSi_2 (рис. 2). Совместное образование этих фаз обусловлено близкими значениями удельной энтальпии образования, а также одинаковым типом кристаллической решетки моно- и дисилицида [4]. В результате воздействия компрессионного потока, имеющего большую плотность энергии (при использовании водорода в качестве плазмообразующего вещества), в реакциях силицидообразования участвует большая часть никеля. Это связано тем, что процессы жидкофазной диффузии и конвекции происходят в данном случае более интенсивно.

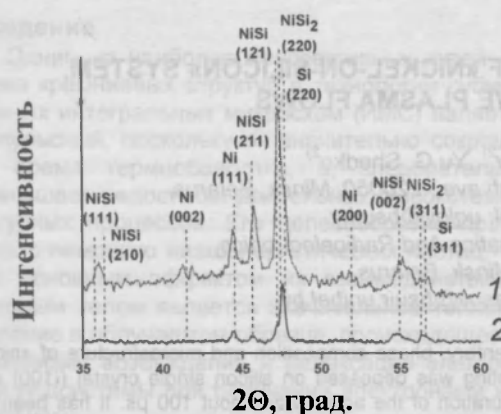


Рис. 2. Участок рентгенограммы образца $\text{Ni/Si}(100)$, обработанного импульсом азотной (1) и водородной (2) плазмы

Особенностью микроструктуры обработанных материалов (рис. 1а, 3) является формирование дендритов с длиной ветвей 2-20 мкм и толщиной до 1 мкм. Увеличение плотности энергии потока приводит к более однородному распределению дендритов по обработанной поверхности (рис. 3, 4а). Преимущественная ориентация дендритов соответствует направлению $[100]$ (рис. 1а). Особенностью пространственного распределения элементов в дендритных областях является повышенное содержание кремния внутри дендритов (рис. 4). Образование данного вида структур описывается в рамках модели концентрационного переохлаждения [5]. При быстром затвердевании кремния происходит вытеснение никеля за границу кристаллизации. В результате этого образуется область жидкости, обогащенной никелем, которая, согласно диаграмме состояния [6], имеет меньшую температуру кристаллизации, т. е. имеет место переохлаждение. При этом любой случайный выступ на границе жидкой и твердой фаз, попадающий в область переохлажденной жидкости, становится устойчивым образованием и при дальнейшем развитии перерастает в дендрит. Ориентация дендритов, главным образом, определяется направлением движения фронта кристаллизации [7]. Увеличение плотности энергии плазменного потока приводит к более интенсивному образованию дендритов по всей обрабатываемой поверхности ввиду увеличения градиента температуры и скорости кристаллизации. Рост дендрита сопровождается диффузией никеля за границу кристаллизации, вследствие чего в меж-

дендритных областях, закристаллизовавшихся позднее, концентрация никеля выше, чем внутри дендритов. В данных областях наиболее вероятно образование моносилицида NiSi , в то время как формирование дисилицида NiSi_2 происходит преимущественно внутри дендритов.



Рис. 3. Изображение поверхности системы $\text{Ni/Si}(100)$, обработанной импульсом водородной плазмы

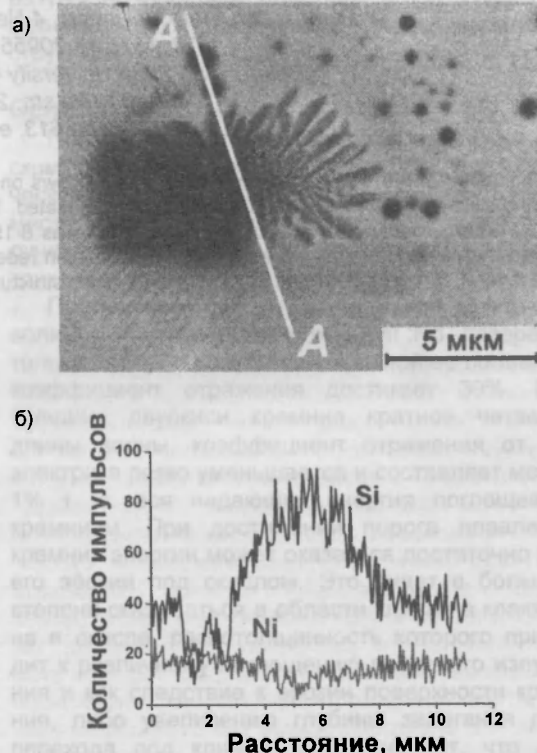


Рис. 4. Микрофотография дендритной структуры (а) и распределения интенсивностей характеристических рентгеновских излучений кремния и никеля вдоль линии AA (б) системы $\text{Ni/Si}(111)$, обработанной импульсом плазмы азота

Заклучение

Обнаружено, что воздействие компрессионных потоков плазмы азота и водорода с плотностью энергии 8-15 Дж/см² и продолжительность импульса ~ 100 мкс на систему «никелевое покрытие-монокристаллический кремний» (ориентация (100) и (111)) приводит к:

- перераспределению никеля и кремния в приповерхностном слое толщиной 10-15 мкм;
- образованию силицидов никеля NiSi , NiSi_2 ;
- формированию дендритов с длиной ветвей 2-20 мкм и толщиной до 1 мкм, внутри которых

содержание кремния больше, чем в междендритных областях.

Установлено, что изменения структуры и фазового состава обусловлены расплавлением покрытия никеля и части кремниевой подложки, их перемешиванием в жидкой фазе за счет взаимной диффузии и конвекции, и, наконец, последующей кристаллизацией, сопровождающейся концентрационным переохлаждением.

Список литературы

1. L. J. Chen // JOM, vol. 57 – 2005 - No. 9 - P. 24-31.
2. В. В. Углов, В. М. Анищук, Ю. А. Петухов, В. М. Асташинский, А. М. Кузьмицкий, Н. Т. Квасов / 5th International Conference "New Electrical and Electronic Technol-

ogy and their Industrial Implementation", Zakopane, Poland, 2007 - P. 63.

3. В.В. Аскерко, А.С. Емельяненко, И. Г. Гумро, А. В. Ковязо, А. А. Мишук / 6-я международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» - Минск, 2005 - С. 200-202.

4. Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС. Мир, Москва, 1982 176 с.

5. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов. Мир, Москва, 1967. 160 с.

6. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Т. 3, Кн. 1 / Под ред. Н. П. Лякишева. Машиностроение, Москва, 1997. 576 с.

7. Boettinger W. J., Coriell S. R., Greer A. L., Karma A., Kurz W., Rappaz M., Trivedi R. // Acta materialia - vol. 48 – 2000 – P. 43-70

STRUCTURE AND PHASE COMPOSITION OF «NICKEL-ON-SILICON» SYSTEM, SUBJECTED TO COMPRESSIVE PLASMA FLOWS

Yu. A. Petukhou¹⁾, N. T. Kvasov²⁾, Yu.G. Shedko²⁾

¹⁾Belarussian State University, 4 Nezalezhashi ave., 220050, Minsk, Belarus,
Tel. +375 17 2095512, e-mail: uglov@bsu.by

²⁾Belarussian State University Of Informatics And Radioelectronics,
6 P. Brouka str., 220013, Minsk, Belarus,
Tel. +375 17 2938613, e-mail: kvasov@bsuir.unibel.by

Influence of the action of compressive plasma flows on the elementary, phase composition and microstructure of «nickel coating-silicon substrate» system have been investigated. Nickel coating was deposited on silicon single crystal ((100) and (111)). Energy density transferred by plasma flows was 8-15 J/cm², duration of the action was about 100 μ s. It has been revealed that the action of compressive plasma results in redistributing of the elements of the coating and substrate in the surface layer, forming of the nickel silicides and dendritic structure.