

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ НА КОНТАКТ ТИТАН—КРЕМНИЙ

Чапланов А. М., Шибко А. Н., Лазаренко А. В., Чебуков Е. С.,
Энгелько В. И., Бортнянский А. Л., Клопенков М. Л., Павловец М. В.

Исследовались структурные и фазовые превращения, изменение электрофизических параметров контакта титан—кремний при импульсном электронно-лучевом воздействии. Длительность импульса тока составляла ~ 10 мкс. Показано, что при электронной обработке стимулируются диффузия атомов титана в кремниевую подложку, а также выход атомов кремния на поверхность образца с образованием силицида и дисилицида титана. Образование новых фаз влияет на изменение электрофизических параметров контакта. Методом обратного резерфордовского рассеяния исследуется граница раздела титан—кремний после электронной обработки контакта.

В последнее время при создании СВИС стали активно применяться тугоплавкие металлы и их силициды. Широкое применение силицидов тугоплавких металлов в микроэлектронике обусловлено рядом их термодинамических особенностей, перспективными электрическими свойствами, стабильностью при высоких температурах. Высокотемпературные технологические процессы ограничивают выбор конструкционных материалов, оказывают влияние на стабильность параметров, вследствие чего в технологии производства полупроводниковых приборов начинают использоваться локальные и импульсные методы термического воздействия. К ним в первую очередь относятся импульсные электронные и лазерные пучки [1].

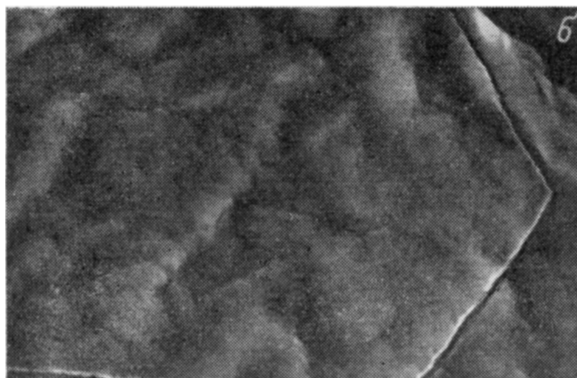
В настоящей работе исследовались структурные и фазовые превращения, изменение электрофизических параметров контакта Ti—Si при импульсном электронно-лучевом воздействии.

Пленка титана толщиной 100 нм наносилась на кремниевую подложку n -типа ориентации (111) методом термического осаждения в вакууме $4 \cdot 10^{-5}$ Па, температура подложки составляла около 373 К. Толщина осажденного слоя измерялась как с помощью кварцевого датчика, так и методом обратного резерфордовского рассеяния и была равна $\sim (90 \pm 10)$ нм. Согласно между этими двумя методами было вполне удовлетворительно. Пленка титана являлась поликристаллической, мелкодисперсной, средний размер зерна составляет 15—20 нм.

Обработка системы Ti—Si осуществлялась на сильноточном импульсном ускорителе электронов [2]. Параметры пучка электронов при обработке изменялись в пределах: ускоряющее напряжение 50—220 кВ, плотность тока на образцах до 50 А/см², длительность импульса тока 1—20 мкс. Глубина воздействия зависит в основном от природы обрабатываемого материала и энергии электронов. Температура поверхности определяется длительностью импульса тока. При длительности импульса тока ~ 10 мкс скорость нагрева достигает величины $\sim 10^8$ град/с [3]. При таких условиях отжига система Ti—Si находится в неравновесном состоянии, что оказывает существенное влияние на процессы диффузии, протекающие в течение теплового импульса, и перераспределение кислорода.

Структурные и фазовые превращения, произошедшие в композиции Ti—Si после электронно-лучевого облучения, исследовались методами электронной микроскопии и электронографии на «отражение» на микроскопах BS-350 и JEM-120.

Как показали проведенные исследования, при обработке двухслойной системы электронным пучком происходят укрупнение и рост отдельных зерен, которые растут перпендикулярно подложке, структура принимает более равновесное состояние. С повышением плотности энергии обработки происходят перераспределение дефектов кристаллической решетки, рост зерен путем миграции межзеренных границ. При облучении композиции Ti—Si с плотностью энергии 1.8 Дж/см² на электронограммах от образцов присутствуют рефлексы фаз Ti, TiSi. С увеличением плотности энергии до 8 Дж/см² стимулируются реакции взаимодействия титана с кремнием, который диффундирует, и образуется соединение, характеризующееся большим содержанием кремния — TiSi₂. На электронограммах, соответствующих образцам при таких параметрах обработки присутствуют линии рефлексов силицида и дисилицида кремния, причем рефлексы TiSi₂ самые интенсивные для этого соединения (рис. 1, а). На электронограммах, полученных от системы Ti—Si, обработанной с плотностью энергии 8—15 Дж/см², присутствуют лишь рефлексы TiSi₂. Это свидетельствует о том, что пленка титана при данных параметрах электронно-лучевой обработки полностью прореагировала с полупроводниковой подложкой. Время обработки 10 мкс, ускоряющее напряжение 90 кВ. При повышении времени обработки до 20 мкс с той же плотностью энергии обработки существенных фазовых



лексы TiSi₂ самые интенсивные для этого соединения (рис. 1, а). На электронограммах, полученных от системы Ti—Si, обработанной с плотностью энергии 8—15 Дж/см², присутствуют лишь рефлексы TiSi₂. Это свидетельствует о том, что пленка титана при данных параметрах электронно-лучевой обработки полностью прореагировала с полупроводниковой подложкой. Время обработки 10 мкс, ускоряющее напряжение 90 кВ. При повышении времени обработки до 20 мкс с той же плотностью энергии обработки существенных фазовых

Рис. 1. Электронограмма и структура композиции Ti—Si после электронного отжига.

Плотность энергии воздействия, Дж/см²: а — 8, б — > 15.

и структурных отличий не наблюдалось. При воздействии на образцы плотностью энергии > 15 Дж/см² наблюдается разрушение поверхностного слоя (рис. 1, б). Причем нарушенные области имели форму равносторонних треугольников, стороны которых ориентированы в направлениях $\langle 111 \rangle$. На электронограмме места отслоения «треугольника» дают рефлексы фазы Si. Необходимо отметить отсутствие на электронограммах рефлексов фаз окислов титана. Это вызвано высокими скоростями нагрева и охлаждения системы Ti—Si, и кислород, адсорбированный пленкой при термическом осаждении, не успевает прореагировать с титаном.

Анализ образцов методом обратного резерфордовского рассеяния (RBS) на электростатическом ускорителе при энергии ионов гелия 2 МэВ (угол рассеяния 170°) [4] показал, что выход обратно рассеянных ионов гелия от титана на поверхности кремния после импульсной обработки уменьшается почти в 3 раза, что свидетельствует о реактивной диффузии титана в кремний. На рис. 2, а представлен экспериментальный спектр обратного рассеяния ионов гелия от пленки титана на поверхности кремниевой пластины. На рис. 2, б представлен спектр этого же образца, отожженного импульсным электронным пучком с плотностью энергии обработки 8 Дж/см². Из анализа спектра получен по глубине образца профиль распределения атомов титана и кремния (рис. 3). На рис. 3, а представлена концентрация атомов при облучении образца электронным пучком с плотностью энергии воздействия 1.8 Дж/см². На поверхности контакта соотношение атомов примерно одинаково, на расстоянии от поверхно-

Изменение электрофизических параметров
контакта Ti—Si при импульсном электронно-
лучевом воздействии

Плотность энергии воздействия E , Дж/см ²	Величина высоты барьера Шоттки ϕ_b , эВ	Напряжение пробоя U , В	Коэффициент идеальности n
Исходная	0.54	6	1.16
1.8	0.55	10	1.13
5	0.56	15	1.11
6	0.56	15	1.11
7	0.56	10	1.10
8	0.57	25	1.09
10	0.57	25	1.09
15	0.58	30	1.06

сти 30 нм концентрация атомов Ti и Si соответственно равна 41 и 59 %, на глубине 90 нм — 20 и 80 %. Это согласуется с результатами, полученными методами электронной микроскопии по фазовому составу системы титан—кремний.

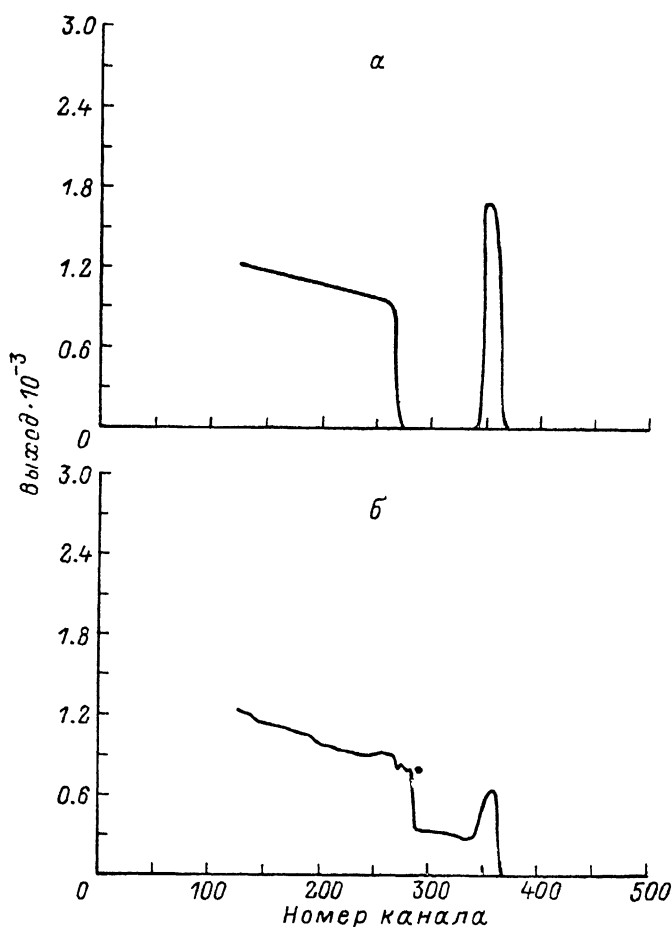


Рис. 2. Спектры обратного рассеяния ионов гелия от композиции Ti—Si ($E_0=2$ МэВ, $\theta=170^\circ$).
а — исходная, не обработанная; б — после обработки с плотностью энергии воздействия 8 Дж/см².

На рис. 3, б представлен элементный состав контакта Ti—Si после воздействия импульсной термообработки с плотностью энергии воздействия 8 Дж/см². Элементный состав поверхности образца состоит из концентрационного соотно-

шения Ti и Si — 35 и 65 %. На расстоянии 30 нм от поверхности соотношение составляет соответственно 30 и 70 %, на расстоянии 90 нм концентрация атомов Ti и Si равна соответственно 12 и 88 %. Более высокая концентрация атомов кремния в поверхностном слое у данного образца подтверждает образование дисилицида титана $TiSi_2$ при импульсной термообработке с плотностью энергии 8 Дж/см² (рис. 1, а). Как следует из приведенных графиков, концентрация атомов титана уменьшается с увеличением расстояния от поверхности образца. Изменение атомарной концентрации происходит плавно, равномерно, что объясняется диффузией, влияющей на границу раздела титан—кремний при электронном воздействии на контакт. Результаты, полученные методами электронной микроскопии и обратного резерфордского рассеяния, коррелируют между собой, показывают, что при электронно-лучевом воздействии на компо-

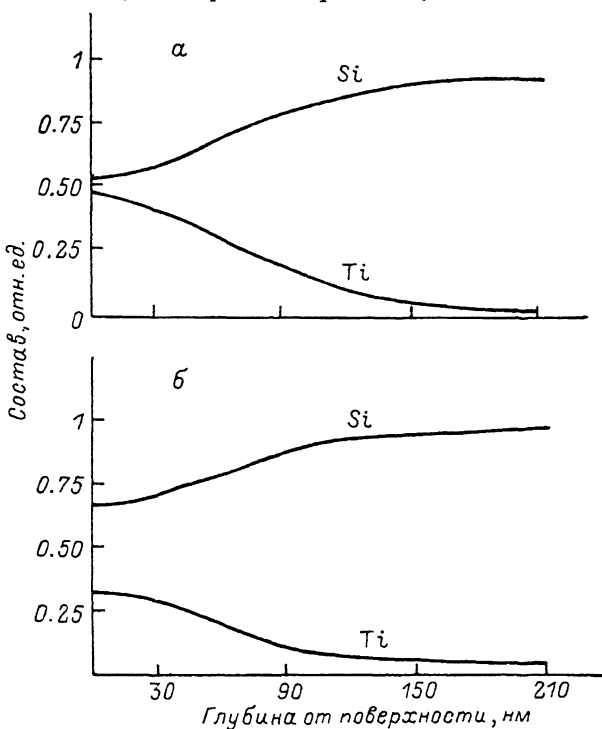


Рис. 3. Элементный состав поверхностного слоя композиции после импульсного электронно-лучевого воздействия.

Плотность энергии обработки, Дж/см²: а — 1.8, б — 8.

зицию Ti—Si в результате импульсного нагрева до предплавления температуры стимулируются реактивная диффузия атомов титана в кремниевую подложку, а также выход атомов кремния на поверхность образца, приводящие к образованию и росту фаз $TiSi$ и $TiSi_2$.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) контакта Ti—Si измерялись по методике, описанной в работе [5]. Как следует из таблицы, при повышении плотности энергии обработки высота барьера Шоттки увеличивается от 0.54 у исходного образца до 0.59 эВ у обработанного контакта с плотностью энергии обработки 15 Дж/см². Это связано прежде всего с реактивной диффузией кремния при импульсной обработке и последующим образованием силицида и дисилицида титана. Коэффициент идеальности $n \approx 1$, ВАХ стремится к идеальному виду при увеличении плотности энергии воздействия. Напряжение пробоя изменяется от 6 до 30 В. Исследования методом RBS перераспределения кислорода в системе титан—кремний при отжиге показали, что в зависимости от условий отжига на расстоянии от поверхности наблюдается повышение концентрации кислорода, что, по-видимому, вызвано образованием двуокиси кремния, и отожженная система состоит из слоя силицида кремния, затем идут двуокись кремния

и кремний [6]. Следовательно, электронно-лучевой отжиг вызывает аналогичные изменения границы раздела Ti—Si за счет перераспределения кислорода, находящегося в пленке и в окружающей среде, что и приводит к увеличению напряжения пробоя.

В работе [7] представлены исследования по обработке контактов Ti—Si электронным пучком и получению выпрямляющих контактов. Представлена кинетика образования силицидов и дисилицидов титана в зависимости от плотности энергии воздействия. По сравнению с данной работой в [7] обработка происходила со следующими параметрами: плотность энергии обработки 12—48 Дж/см², время обработки одного образца 0.4 с, ток на образце 9—17 мА. Обработка происходила на установке с ускоряющим напряжением 30 кВ. Различие полученных результатов наблюдается в электрофизических параметрах образцов прежде всего в величине напряжения пробоя, вызванного изменением строения границы раздела Ti—Si. Это обусловлено появлением термоупругих напряжений, возникающих при обработке длительностью импульса $< 10^{-5}$ с, а также наличием слоя SiO₂ между силицидом и кремнием. Пучок электронов с большей энергией, но меньшим временем обработки вызывает перераспределение атомов кислорода, находящихся в образце при осаждении, что изменяет границу раздела Ti—Si. При обработке по методу [7] процессы нагрева и охлаждения происходят в более равновесных условиях, поэтому при обработке, превышающей плотность энергии воздействия 48 Дж/см², наблюдается расплав на поверхности кремниевой подложки. При обработке на сильноточном импульсном ускорителе с плотностью энергии воздействия в течение 1÷20 нс < 15 Дж/см² происходит ускоренная диффузия в аномальных неравновесных условиях, что приводит с качественно иным результатам.

Таким образом, электронно-лучевое импульсное воздействие на систему Ti—Si изменяет ее электрофизические параметры в зависимости от плотности энергии пучка и длительности облучения, что показывает перспективность ее применения в технологии микроэлектроники для формирования барьеров Шоттки.

Список литературы

- [1] Модифицирование и легирование поверхности лазерными ионными и электронными пучками / Под ред. Дж. М. Поута. М., 1987. 286 с.
- [2] Большаков Е. П., Комаров О. Л., Лазаренко А. В. и др. // ПТЭ. 1988. № 6. С. 18—20.
- [3] Большаков Е. П., Комаров О. Л., Лазаренко А. В. и др. Препринт ЦНИИАтоминформ. М., 1987. СИУ-0748.
- [4] Бортнянский А. Л., Клопенков М. Л., Котан Э. и др. Препринт ЦНИИАтоминформ. М., 1989. Д-0809.
- [5] Родерик Э. Х. Контакты металл—полупроводник. М., 1982. 208 с.
- [6] Li B. Z., Zhou S. F., Hong F. et al. // J. Vac. Sci. Techn. 1988. V. 6. N 6. P. 1714—1720.
- [7] Чапманов А. М., Шибко А. Н. // Матер. I Всес. конф. «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц». Томск, 1984. Ч. 3. С. 62—63.

Институт электроники АН БССР
Минск

Получена 25.04.1990
Принята к печати 31.10.1990