



## Формирование силицидных пленок металлов ионными методами

Т. И. Данилина, И. А. Чистоедова, Е. С. Польшцев

*Исследована возможность формирования пленок силицидов металлов ионными методами, реализованными с помощью ионно-плазменного распыления в устройстве на основе пеннинговского разряда, а также комбинацией методов термического испарения металлов в высоком вакууме с ассистированием ионным пучком кремния. Установлен механизм образования силицидных пленок на различных подложках при сравнительно низкой температуре подложек до 300 °С в условиях ограниченного воздействия плазмы. Изготовлены экспериментальные образцы на основе силицидов Mo, W, W-Re, Ti в широком диапазоне сопротивлений 20–600 Ом/□ с температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) менее 10<sup>-4</sup> град<sup>-1</sup>, что позволяет их рекомендовать в качестве проводящих и резистивных слоев для элементов микро- и нанoeлектроники. Параметры методов с ассистированием ионными пучками были установлены с помощью моделирования процессов внедрения ионов, осаждения титана с учетом распыления и последующей экспериментальной отработки режимов при получении пленок силицидов титана. При отжиге при 700 °С состав пленок был близок к дисилициду титана, сопротивление образцов уменьшилось до 1,6 Ом/□, что позволяет рекомендовать разработанные ионные методы в КМОП-технологиях.*

*Ключевые слова:* силицид металла, ионно-лучевая обработка, КМОП, низкотемпературный процесс, образование силицида.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-68-75

### Введение

Силицидные пленки металлов имеют большое значение для приборов микро- и нанoeлектроники, что обусловлено возмож-

ностью их применения в качестве проводящих слоев для металлизации интегральных схем, возможностью создания омических контактов в КМОП-структурах на кремниевых подложках, а также в качестве проводящих и резистивных слоев для структур на подложках, не содержащих кремний [1–4]. Наибольшее распространение получили дисилициды переходных металлов (титан, кобальт, никель и др.), прежде всего в качестве материалов с низким удельным сопротивлением [2, 3].

В основном тонкопленочные силицидные системы получают путем взаимодействия тонких металлических пленок с кремнием при высокой температуре спекания (силицидная технология) [2, 3]. Температуры образования стабильных фаз дисилицидов составляют для TiSi<sub>2</sub> больше 850 °С, для CoSi<sub>2</sub> больше 700 °С, для NiSi<sub>2</sub> 400–550 °С [2]. Для получения требуемых параметров контактов в КМОП-тех-

Данилина Тамара Ивановна<sup>1</sup>, профессор, к.т.н.  
E-mail: danti@mail.ru

Чистоедова Инна Анатольевна<sup>1</sup>, доцент, к.т.н.  
E-mail: innachist@mail.ru

Польшцев Егор Сергеевич<sup>2</sup>, аспирант.  
E-mail: e.polyntsev@gmail.com

<sup>1</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет.

Россия, 634050, г. Томск, просп. Ленина, 36.

Статья поступила в редакцию 27 июля 2022 г.

© Данилина Т. И., Чистоедова И. А., Польшцев Е. С., 2022

нологиях иногда приходится использовать более сложные композиции силицидов, например, Ni(Pt)Si. По значениям сопротивлений проводящие материалы располагаются в следующей последовательности: в диапазоне от 1 до 10 мкОм·см от Cu, Ag к W; в диапазоне от 10 до 100 мкОм·см от Ni, Co к Ti [1]. Одной из ключевых задач при разработке силицидного процесса является контроль конкретной фазы (соединения), образующейся в результате реакции металл-кремний. Кобальт, например, может реагировать с кремнием с образованием  $Co_2Si$ ,  $CoSi$ ,  $CoSi_2$  и других соединений. Однако только  $CoSi_2$  имеет достаточно низкое сопротивление для образования эффективного электрического контакта. Для дисилицида титана известно наличие двух фаз: фаза  $TiSi_2(C49)$  образуется при температуре подложки 350–700 °С с характерным сопротивлением 60–80 мкОм·см. При повышении температуры спекания до 750 °С и выше образуется фаза  $TiSi_2(C54)$  с сопротивлением 15–20 мкОм·см [2].

Однако на сегодняшний день силицидные пленки востребованы также в устройствах, в которых невозможно использовать высокотемпературные методы спекания. В связи с этим, исследование ионно-плазменных низкотемпературных методов формирования силицидных пленок для различных устройств, в том числе с материалами подложек, не содержащих кремний, представляется задачей актуальной. Опыт авторов в формировании тонкопленочных структур ионно-плазменными методами и исследовании их свойств показал, что ионные технологии можно использовать для получения пленок с широким управляемым диапазоном сопротивлений в зависимости от условий осаждения [5–7]. Целью данной работы является обобщение результатов разработки процессов формирования силицидных пленок металлов ионными методами и исследование их электрофизических свойств.

### Методика и техника эксперимента

Исследуемые пленки силицидов металлов в данной работе были получены двумя ионными методами. Первый метод заключался в ионно-плазменном распылении кремневой и металлической мишеней в устройстве на

основе пеннинговского разряда. Второй метод представлял собой термическое испарение металла в комбинации с использованием ионных пучков кремния (ионное ассистирование).

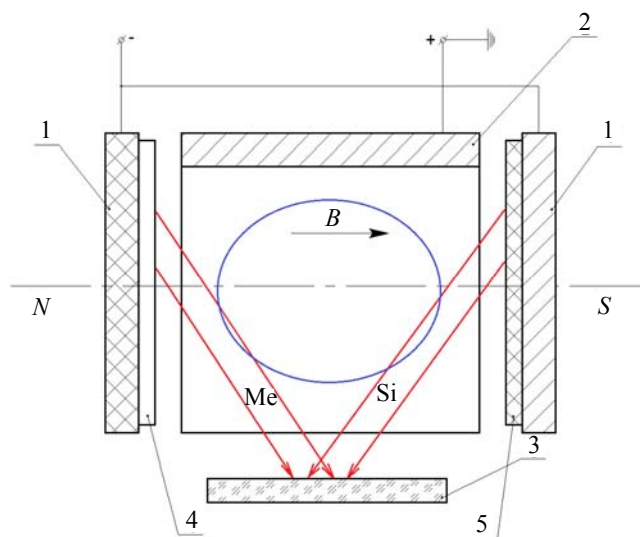


Рис. 1. Схема расположения электродов для устройства на основе пеннинговского разряда: 1 – катод-мишень; 2 – анод; 3 – подложка; 4 – мишень из металла; 5 – мишень из кремния

В устройстве на основе пеннинговского разряда плазма поддерживается между двумя катодами 1 и анодом 2 (рис. 1). Система находится в магнитном поле, перпендикулярном плоскости катодов. За счет скрещенных электрических и магнитных полей удается поддерживать высокую плотность плазмы при сравнительно низких разрядных напряжениях и давлениях рабочего газа.

Для получения пленок силицида молибдена в устройстве на основе пеннинговского разряда одновременно распылялись мишени молибдена 4 и кремния 5, размещенные на катодах. Распыленные атомы молибдена и кремния с обоих катодов поступают через открытую часть анода на подложку 3, которая вынесена из разряда на расстояние  $L$  и расположена на изолированном держателе. При выносе подложки из разряда и наличии параллельного плоскости подложки магнитного поля уменьшаются ее электронно-ионная бомбардировка и нагрев за счет излучения плазмы. Давление рабочего газа аргона в процессе распыления составляло 0,1–0,3 Па. Скорость осаждения силицидных пленок молибдена составляла 0,1–0,3 нм/с при разрядном напряжении 1,4–1,7 кВ. Подложка во время осаждения нагревалась до температуры 150–

300 °С. Рабочая камера предварительно откачивалась до давления менее  $10^{-3}$  Па. Удельное поверхностное сопротивление  $\rho_s$  измерялось четырехзондовым методом. ТКС оценивался в диапазоне температур от 25 до 500 °С.

Вследствие того, что на подложку при распылении одновременно осаждаются атомы с двух мишеней, ожидаемый состав двухкомпонентных пленок будет определяться коэффициентами распыления соответствующих материалов и соотношением площадей распыления каждого компонента. Например, коэффициент распыления у кремния почти в два раза больше, чем у молибдена. Поэтому на подложке на каждый поступающий атом молибдена должно приходиться два атома кремния, т. е. ожидаемый состав пленок должен соответствовать соединению  $\text{MoSi}_2$ . Однако, многообразие трудно учитываемых факторов, влияющих на процесс получения пленок, требует непосредственной экспериментальной оценки их состава.

### Результаты и обсуждение

Проведенные авторами ранее и представленные в [8] масс-спектрометрические исследования пленок силицидов, осажденных методом ионно-плазменного распыления, показали, что при таком распылении на подложку поступают отдельные атомы кремния и металла. Одновременно на ней адсорбируются молекулы воды и кислорода, которые присутствуют в достаточном количестве в рабочей камере при давлении рабочего газа 0,1–0,3 Па.

Кремний адсорбируется на подложке физически, поэтому непосредственная поверхностная реакция между металлом и кремнием при сравнительно низкой температуре затруднена. Она облегчается за счет диссоциации, возбуждения и ионизации кремния при бомбардировке подложки низкоэнергетичными электронами из плазмы [8, 9]. Образование же связи Si-O, Me-O возможно за счет химического взаимодействия молекулярного кислорода с кремнием и металлом. В дальнейших исследованиях было зафиксировано небольшое содержание оксидов кремния при формировании силицидных пленок молибдена. При устранении электронно-ионной бомбардировки количество окислов в пленках увеличивалось, что фиксировалось по смещению пиков поглощения в ИК-спектрах. В тоже время ин-

тенсивная электронно-ионная бомбардировка полупроводниковых структур, выступающих в качестве подложек, приводит к деградации их параметров вследствие возникновения радиационных дефектов.

Таким образом, формирование силицидных пленок ионно-плазменными методами сопровождается, с одной стороны, негативным воздействием электронно-ионной бомбардировки на подложку, вызывая ее деградацию. С другой стороны, низкоэнергетичная электронно-ионная бомбардировка способствует формированию пленок стехиометрического состава иницируя на подложке протекание реакции образования соединений [8, 9]. При этом полное устранение электронно-ионной бомбардировки приводит к нарушению стехиометрии в сторону формирования силицидных пленок с окислами.

Для анализа состава осажденных пленок использовался метод резерфордского обратного рассеяния (ROR). На рис. 2 показаны энергетические спектры ROR для силицидов  $\text{Mo}_x\text{Si}_{1-x}$ , полученных при разных условиях осаждения на подложках из поликора.

Результаты анализа спектров ROR показали, что состав силицидных пленок молибдена зависит от условий осаждения. Пленки, полученные при низкой температуре подложки 100 °С, сразу после напыления имеют состав, соответствующий соединению: Si – 0,5, Mo – 0,5 (рис. 2, сплошная кривая 1). Повышение температуры подложки во время осаждения до 350 °С увеличивает содержание кремния в пленках: Si – 0,695, Mo – 0,305, т. е. образуется соединение  $\text{MoSi}_2$  (рис. 2, пунктирная кривая 2) [6].

При распылении в этом же устройстве на основе пеннинговского разряда мишеней из вольфрама и кремния одинаковых площадей получены пленки со следующим содержанием элементов: W –  $0,38 \div 0,44$ , Si –  $0,62 \div 0,56$ . Отсюда следует, что элементный состав двухкомпонентных пленок не всегда соответствует составу, который должен бы получиться, исходя из соотношения распыляемых площадей и коэффициентов распыления. В дальнейших экспериментах для получения двухкомпонентных пленок распылению подвергались мишени одинаковых площадей, обрабатывались режимы осаждения и термообработки пленок с целью получения воспроизводимых параметров.

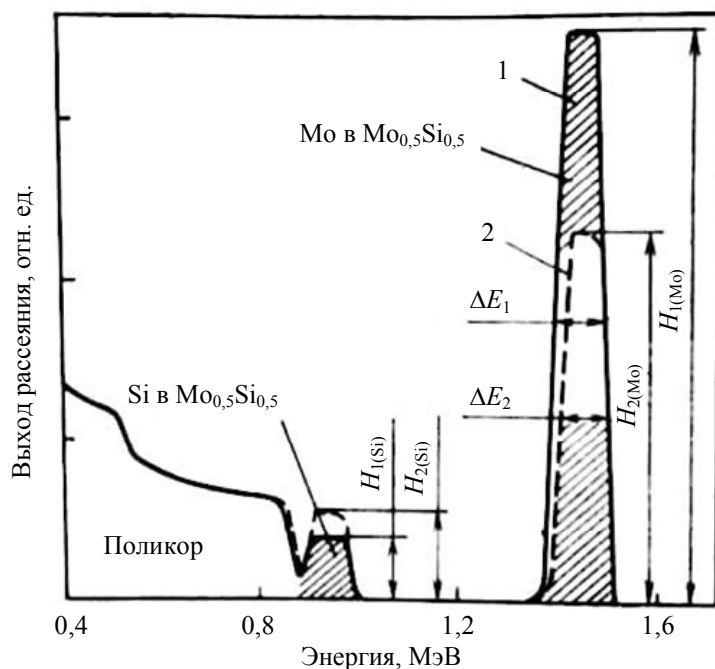


Рис. 2. Энергетические спектры РОР образцов  $Mo_xSi_{1-x}$ : 1 –  $Mo_{0,5}Si_{0,5}$ ; 2 –  $Mo_{0,305}Si_{0,695}$

Также в устройстве на основе пеннинговского разряда была реализована технология получения многокомпонентных силицидных пленок на основе W-Re-Si. С этой целью была изготовлена мишень из сплава вольфрам-рений с содержанием рения 24 %, вольфрама 76 %. Кремний размещался на поверхности этой мишени в виде накладок соответствующей площади, рассчитанной с учетом коэффициентов распыления W, Re, Si.

Структура пленок исследовалась на электронном микроскопе, их состав оценивался методом рентгеноспектрального анализа. Результаты исследований показали, что полученные по такой технологии пленки имеют поликристаллическую структуру. Причем, увеличение температуры подложки при осаждении и отжиге до 300 °C сопровождается увеличением размеров зерен в пленке от 30÷100 нм до 100÷300 нм. Причем на электронограмме наблюдается два типа дефектов (кольцевые и точечные), которые не совпадают друг с другом, что можно объяснить наличием двух типов поликристаллов.

Рентгеноспектральный анализ полученных силицидных пленок на основе W-Re-Si показал, что их элементный состав отличается от состава распыляемой мишени. При распылении мишени, содержащей 24 % Re и 76 % W, в пленке, осажденной на подложку, находящейся при комнатной температуре, наблюдается увеличение Re до 35 %, а в плен-

ке, осажденной на подложку при температуре 300 °C, содержание Re составляет 55 %. Установлено, что характеристический пик рения сдвинут вправо, что можно объяснить образованием окислов рения. Вероятнее всего, одному из типов поликристаллов в пленке, о которых говорилось выше, соответствует окисная фаза, а другому – металлическая.

Анализ проведенных исследований электрических свойств полученных силицидных пленок показал, что характерной особенностью пленок W-Si, Mo-Si является отрицательный знак ТКС для любых концентраций указанных компонент. Резистивные пленки, полученные при распылении мишеней, содержащих 70–50 % вольфрама, 30–10 % молибдена, 0–40 % кремния, имеют удельное поверхностное сопротивление  $\rho_s$  от 20 до 600 Ом/□ и ТКС менее  $10^{-4}$  град<sup>-1</sup>. Пленки с большим  $\rho_s$  обладают большим отрицательным ТКС. Отрицательный ТКС говорит о том, что проводимость силицидных пленок не является чисто металлической, в них присутствуют промежуточные фазы силицидов и окислов.

Изготовленные образцы силицидных пленок W-Re и W-Re-Si отличались высокой стабильностью. При нагреве в вакууме до 350 °C в течении 100 часов изменение сопротивления резисторов на основе пленок W-Re-Si составило 0,35 %. При хранении в нормальных условиях сопротивление меняется на 1–

2 % при выдержке 1000 часов, затем величина его стабилизируется.

Таким образом, ионно-плазменные технологии позволяют формировать разнообразные по сопротивлению проводящие силицидные пленки при сравнительно низких температурах на подложках различного состава. Механизм формирования силицидов обусловлен одновременным поступлением на подложку потоков атомов металла и кремния. Реакция образования силицидного соединения стимулируется за счет воздействия плазмы в виде электронно-ионной бомбардировки. Наиболее стабильные пленки были получены с удельным поверхностным сопротивлением в диапазоне от 20 до 50 Ом/□ с применением отжига при температуре 650 °С в вакууме сразу после напыления. Требуемые более низкие сопротивления для КМОП-структур получить ионно-плазменными методами не удалось.

Дальнейшие исследования процесса низкотемпературного формирования пленок силицидов металлов, проводимых авторами, заключалось в сочетании напыления титана с ассистированием низкоэнергетическим ионным пучком кремния. В ходе исследований было реализовано две методики: первая – конденсация атомов титана с одновременной бомбардировкой подложки ионами кремния; и вторая – периодическая бомбардировка подложки ионами кремния при послойном напылении пленок титана.

Техника эксперимента по первой методике была следующей. Для получения пленок титана был использован испаритель кольцевого типа, обеспечивающий в его центральной части свободное прохождение к подложке пучка ионов кремния, сформированного в ионном источнике. При одновременном осаждении на подложке атомов титана с бомбардировкой ионами кремния необходимо, чтобы количество бомбардирующих ионов было в два раза больше потока атомов титана из испарителя. При скорости осаждения титана 14 нм/мин для получения пленки толщиной 50 нм потребуется приблизительно 4 мин. При этом для плотности тока ионов 250 мкА/см<sup>2</sup> доза облучения составит  $3 \times 10^{17}$  ион/см<sup>2</sup>.

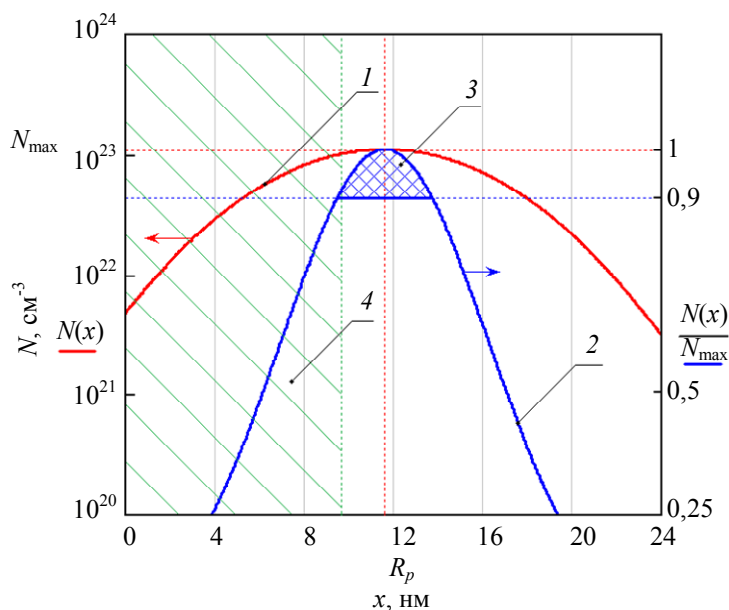
При методике послойного напыления предварительно на подложку напыляется пленка титана и затем она облучается ионами

кремния. Толщина отдельного слоя должна быть равна глубине проникновения ионов, которая характеризуется средним проецированным пробегом  $R_p$  с учетом страгглинга  $\Delta R_p$ , тогда при достаточной дозе внедряющихся ионов кремния можно ожидать образование силицида по всей толщине. Суммарная толщина синтезируемой пленки будет определяться количеством проведенных циклов напыление-внедрение. В этих экспериментах скорость осаждения титана составляла 14 нм/мин, а энергия ионов кремния составляла 7 кэВ. Требуемая доза внедрившихся ионов рассчитывалась таким образом, чтобы в области образования силицида на каждый атом титана приходилось два иона кремния. Учитывая атомную плотность титана  $5,6 \times 10^{22}$  ат/см<sup>3</sup>, потребуется обеспечить максимальную концентрацию ионов  $1,12 \times 10^{23}$  см<sup>-3</sup>.

С точки зрения рассматриваемого процесса синтезирования наиболее важными являются процессы внедрения ионов кремния, распыления и осаждения титана. На рис. 3 представлены результаты моделирования процессов внедрения ионов кремния в пленку титана 1, нормированный профиль распределения кремния в титане 2, область образования силицида титана 3 и область распыления 4. Параметры внедрения рассчитывались по теории Линдхарда-Шарфа-Шютта [9]. При энергии ионов 7 кэВ средний проецированный пробег ионов кремния в титане составил 11,6 нм. Максимум концентрации внедренных ионов  $N_{\max}$  расположен на расстоянии  $R_p$  и составляет  $10^{23}$  см<sup>-3</sup> (рис. 3, кривая 1).

Если область формирования силицида принять на уровне 0,9 максимума кривой распределения  $N(x)$  (рис. 3, кривая 2), то границы области формирования силицида будут лежать на расстоянии  $\pm 2,3$  нм по обе стороны от максимума. Отсюда из рис. 3 толщина первого слоя титана должна составлять 14 нм. Количество атомов титана, содержащихся в области толщиной 4,6 нм, составит  $n_1 = 2,6 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Необходимая доза внедрившихся ионов рассчитывается так, чтобы количество ионов кремния  $n_2$ , было в два раза больше, чем атомов титана  $n_1$ , т. е.  $n_2 = 5,2 \times 10^{16}$  см<sup>-2</sup>. Число ионов, застрявших в слое толщиной  $d$  за 1 секунду, можно определить, как  $n_i = 0,9 \times N(R_p) \times d$ , [см<sup>-2</sup>].





*Рис. 3. Результаты моделирования внедрения ионов кремния в пленку титана с учетом ее частичного распыления: 1 – распределение концентрации ионов кремния в пленке титана; 2 – нормированный профиль распределения кремния в титане; 3 – область образования силицида; 4 – область распыления пленки титана при легировании*

При энергии ионов кремния 7 кэВ и плотности тока в пучке  $250 \text{ мкА/см}^2$  доза  $Q$  за 1 секунду составит  $1,5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , что соответствует концентрации ионов  $n_i = 5,4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$  в слое толщиной 4,6 нм. Таким образом, время, необходимое для насыщения слоя требуемым количеством ионов кремния, составит 87 с.

Для реализации процесса внедрения ионов кремния в слой титана толщиной 14 нм потребуется доза  $1,36 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . При такой большой дозе облучения на подложке одновременно с внедрением ионов кремния будет происходить частичное распыление пленки титана. Проведенные нами измерения коэффициента распыления (при бомбардировке ионами кремния с энергией 7 кэВ) пленок титана переменной толщины дали величину 0,4 атом/ион. Скорость распыления получилась равной 0,11 нм/мин и за время 87 с будет удален слой толщиной 9,7 нм (область 4 на рис. 3). За один цикл осаждение–внедрение–распыление образуется силицид титана толщиной около 4,6 нм (рис. 3, область 3). С учетом этого толщина всех последующих напыляемых слоев титана должна быть такой, чтобы восполнить распыленный слой и обеспечить прирост толщины пленки как бы с естественным продолжением предыдущего слоя. Исходя из этого, толщина периодически напыляемых слоев титана должна иметь величину около 14 нм. При этом следует учитывать, что толщина силицида при отжиге увеличивается в 2,5 раза согласно [11].

Суммарная толщина образующегося силицида будет определяться количеством циклов напыление–внедрение и при 10 циклах будет составлять 115 нм.

При практической реализации описанной технологии в процессе формирования пленок силицида титана на кремнии подложка предварительно нагревалась до температуры  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ионная бомбардировка приводила к дополнительному увеличению температуры на  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . После бомбардировки пленок титана ионами кремния проводился последующий отжиг сформированных тонкопленочных структур в вакууме при температуре  $450\text{--}700 \text{ }^\circ\text{C}$  в течении 15 минут. Из спектров РОР следует, что пленки, полученные при температуре отжига  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , имели состав, соответствующий соединению  $\text{TiSi}$  и обладали сопротивлением  $17 \text{ Ом/}\square$ , а при отжиге при  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  удельное сопротивление снижалось до  $1,6 \text{ Ом/}\square$  и их состав был близок к  $\text{TiSi}_2$ . Пленки, полученные в рассчитанном режиме, имели толщину  $120\text{--}150 \text{ нм}$ . Увеличение дозы облучения за счет интенсивности ионного пучка в 4 раза уменьшает конечную толщину пленок до  $40\text{--}60 \text{ нм}$  за счет роста скорости распыления при постоянном времени облучения и числе циклов.

### Заключение

В целом, проведенные исследования показали возможность формирования пленок

силицидов металлов ионными методами, реализованными с помощью ионно-плазменного распыления в устройстве на основе пеннинговского разряда, а также комбинацией методов термического испарения металлов в высоком вакууме с ассистированием ионным пучком кремния. Были получены силициды Mo, W, W-Re, Ti в широком диапазоне сопротивлений 20–600 Ом/□ с температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) менее  $10^{-4}$  град<sup>-1</sup>, что позволяет их рекомендовать в качестве проводящих и резистивных слоев для элементов микро- и нано-электроники. Применение ионных методов с ассистированием ионным пучком позволило сформировать силицидные пленки титана с достаточно низкими сопротивлениями до 1,6 Ом/□, позволяющими использовать их в КМОП-технологиях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Lavoie C., Adusumilli P., Carr A. V., Sweet J. S. J., Ozcan A. S., Levrau E., Alptekin E. // ECS Transactions. 2017. Vol. 77. № 5. P. 59.
2. Zhang S. L., Zhang Z. *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications*. – Woodhead, Sawston, 2014. P. 244–301.
3. Murarka S. P., Read M. H., Doherty C. J., Fraser D. B. // Journal of The Electrochemical Society. 1982. Vol. 129. № 2. P. 293.
4. Mahan J. E. // Thin Solid Films. 2004. Vol. 461. № 1. P. 152.
5. Данилина Т. И., Троян П. Е., Сахаров Ю. В., Жидик Ю. С. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20. № 3. С. 40.
6. Данилина Т. И., Ведерников В. А., Заводчиков В. М. // Приборы и системы управления. 1989. № 9. С. 41.
7. Данилина Т. И., Хатников В. И., Битнер Л. Р. // Приборы и системы управления. 1987. № 8. С. 35.
8. Битнер Л. Р., Ведерников В. А., Данилина Т. И. // Известия высших учебных заведений. Физика. 1976. Т. 19. № 12. С. 11.
9. Жидик Ю. С., Чистоедова А. А., Жидик Е. В., Данилина Т. И. / Материалы 13-й Международной конференции «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск. 2019). С. 446–449.
10. Lindhard J., Scharff M., Schiøtt H. E. *Range concepts and heavy ion ranges*. – Copenhagen: Munksgaard, 1963.
11. Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС. – М.: Мир, 1986.

PACS: 84.32.Ff

### Ion formation of metal silicide films

*T. I. Danilina<sup>1</sup>, I. A. Chistoedova<sup>1</sup> and E. S. Polyntsev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
40 Lenina prosp., Tomsk, 634050, Russia

<sup>2</sup>National Research Tomsk State University  
36 Lenina prosp., Tomsk, 634050, Russia  
Email: e.polyntsev@gmail.com

Received July 27, 2022

*The possibility of forming metal silicide films by ionic methods, implemented using ion-plasma sputtering in a device based on a Penning discharge, as well as by a combination of methods of thermal evaporation of metals in high vacuum assisted by a silicon ion beam, has been studied. The mechanism of formation of silicide films on various substrates at a relatively low temperature of the substrates up to 300 °C under conditions of limited exposure to plasma has been established. Experimental samples were based on Mo, W, W-Re, Ti silicides in a wide range of resistances (20–600 Ohm/□) and TCR (less than  $10^{-4}$  deg<sup>-1</sup>), which allows them to be recommended as a conductive and resistive layers for of micro- and nano-electronics devices. The parameters of the methods assisted by ion beams were determined by modeling the processes of ion implantation, titanium deposition, taking into account sputtering, and subsequent*

***experimental testing of the modes in the preparation of titanium silicide films. Upon annealing at 700 °C, the resistance of the samples decreased to 1.6 Ω/□ and the composition was close to that of titanium disilicide, which makes it possible to recommend the developed ion methods in CMOS technologies.***

**Keywords:** metal silicide, ion-beam assistance, CMOS, low-temperature process, silicide formation.

DOI: 10.51368/1996-0948-2022-6-68-75

## REFERENCES

1. C. Lavoie et al., ECS Transactions **77** (5), 59 (2017).
2. S. L. Zhang and Z. Zhang, *Metallic Films for Electronic, Optical and Magnetic Applications*. (Woodhead, Sawston, 2014), p. 244–301.
3. S. P. Murarka, M. H. Read, C. J. Doherty and D. B. Fraser, Journal of The Electrochemical Society **129** (2), 293 (1982).
4. J. E. Mahan, Thin Solid Films **461** (1), 152 (2004).
5. T. I. Danilina, P. E. Troyan, Y. V. Sakharov and Y. S. Zhidik, Dokl. Tom. Sta. Univ. of contr. Sys. and radel. **20** (3), 40 (2017) [in Russian].
6. T. I. Danilina, V. A. Vedernikov and V. M. Zavodchikov, Dev. and Con. Sys., No. 9, 41. (1989) [in Russian].
7. T. I. Danilina, V. I. Khatnikov and L. R. Bitner, Dev. and Con. Sys., No. 8, 35 (1987) [in Russian].
8. L. R. Bitner, V. A. Vedernikov and T. I. Danilina, Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Fiz., **19** (12), 11 (1976) [in Russian].
9. Y. S. Zhidik, A. A. Chistoedova, E. V. Zhidik and T. I. Danilina, *Materials of 13 International conference “Interaction of radiation with a solid body”* (2019), p. 446–449 [in Russian].
10. J. Lindhard, M. Scharff and H. E. Schiøtt, *Range concepts and heavy ion ranges*. (Munksgaard, Copenhagen, 1963).
11. S. P. Murarka, *Silicides for VLSI applications*. (Academic press, 1986).