

ОМИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ Au–Ti– n^+ Si И Au–Ti–Pd₂Si– n^+ Si К КРЕМНИЕВЫМ СВЧ-ДИОДАМ

Д. ф.-м. н. А. Е. Беляев, к. ф.-м. н. Н. С. Болтовец,
Л. М. Капитанчук, В. П. Кладько, д. т. н. Р. В. Конакова,
к. т. н. Я. Я. Кудрик, А. В. Кучук, Т. В. Коростинская,
к. ф.-м. н. О. С. Литвин, к. ф.-м. н. В. В. Миленин, П. В. Неволин,
А. Б. Атаубаева

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва;
НИИ «Орион»; Институт электросварки им. Е. О. Патона
E-mail: konakova@isp.kiev.ua; bms@i.kiev.ua

Рассмотрены межфазные взаимодействия в омических контактах Au–Ti– n^+ Si и Au–Ti–Pd₂Si– n^+ , возникающие в процессе напыления на нагретую подложку, а также при быстром термическом отжиге и при термической обработке. Показано, что низкоомный омический контакт с удельным контактным сопротивлением $\rho_c \leq 10^{-5}$ Ом·см² может быть создан при напылении Pd на нагретую до 330°C подложку n^+ – n^+ –Si, в которой слой n^+ получен диффузией фосфора до концентрации 10^{20} см⁻³. Такой контакт с последующим напылением слоев Ti и Au не деградирует в процессе отжига при 450°C в течение 60 с.

Омические контакты к кремниевым микроэлектронным приборам хорошо изучены, высокотехнологичны и обеспечивают высокие выходные параметры и надежность приборов при их эксплуатации в стандартных температурных режимах [1–4]. Однако преимущественно это относится к приборам, работающим в непрерывном режиме. Для СВЧ-приборов, работающих в импульсном режиме при повышенной мощности, до сих пор идет поиск контактообразующего материала, устойчивого к локальным перегревам, превышающим 300°C, и обеспечивающего удельное контактное сопротивление $\rho_c \approx 10^{-5}$ – 10^{-6} Ом·см² к p^+ - и n^+ -слоям Si. Анализ параметров омических контактов к Si, проведенный, например, в [1–5], показал, что такими материалами могут быть силициды тугоплавких металлов, основное достоинство которых — способность уже в процессе напыления на поверхность Si растворять имеющиеся на ней окислы и образовывать тесный контакт путем формирования силицидов. Последующий отжиг силицидов приводит к обогащению их атомами Si и уменьшению вследствие этого ρ_c .

Однако до настоящего времени практически отсутствуют экспериментальные данные, характеризующие способность контактов к мощным СВЧ импульсным диодам выдерживать кратковременные температурные перегрузки до 300–450°C. В данной работе предпринята попытка восполнить этот пробел.

Образцы и методы их исследования

Исследовались контакты к сильнолегированной фосфором пластине n^+ –Si ($n \approx 2 \cdot 10^{19}$ см⁻³) и к n^+ – n^+ –структуре, полученной легирова-

нием фосфором до 10^{20} см⁻³ кремниевой подложки типа КЭМ с $\rho = 0,002$ Ом·см. В качестве омических контактов использовались двух- и трехслойные структуры Au–Ti– n^+ Si и Au–Ti–Pd₂Si– n^+ Si.

Пленки металлов наносились послойно вакуумным термическим напылением на нагретые до 330 и 400°C подложки кремния при формировании Au–Ti–Pd₂Si- и Au–Ti-структур, соответственно. Методом электронной Оже-спектроскопии исследовались профили распределения компонентов в структурах Au(500 Å)–Ti(500 Å)– n^+ Si и Au(1000 Å)–Ti(500 Å)–Pd₂Si(500 Å)– n^+ Si со сплошной металлизацией образцов. Для измерения удельного контактного сопротивления ρ_c методом TLM (Transition line method) использовались изготовленные с помощью фотолитографии TLM-структуры с контролируемыми размерами контактных площадок и толщиной слоев металлов Au(2000 Å), Ti(1000 Å), Pd(1000 Å). Величину ρ_c , профили распределения компонентов в слоях металлизации, фазовый состав металлизации и морфологию поверхности границы раздела «металл– n^+ Si» после удаления металлизации определяли до и после быстрого термического отжига (БТО) и до и после термической обработки (ТО) образцов. БТО проводился в течение времени $\tau = 60$ с при температуре 450°C и при 500°C, ТО — при $T = 450^\circ\text{C}$ и $\tau = 10$ мин. Профили распределения компонентов металлизации измерялись на Оже-спектрометре LAS-2000, фазовый состав — на рентгеновском дифрактометре Philips X'Pert-MPD ($\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 0,15418$ нм) в геометрии Брега–Брентано, морфология поверхности — на атомно-силовом микроскопе Nanoscope IIIa.

Дата поступления в редакцию
18.09 2009 г.

Оппонент
В. Н. ИВАНОВ
(НИИ «Орион», г. Киев)

Режимы БТО выбираются с точки зрения возможности моделирования импульсной тепловой перегрузки, которую могут испытывать СВЧ-диоды в импульсном режиме, и получения минимально возможного ρ_c , обусловленного завершённостью процесса силицидообразования в контактообразующем слое металлизации на основе палладия.

Существенная разница в толщине слоев металлизации тестовых и TLM-структур обусловлена методическими особенностями электронной Оже-спектроскопии.

Экспериментальные результаты и обсуждения

Из приведенных на рис. 1 профилей распределения компонентов в слое омической металлизации Au-Ti-n⁺Si видно, что структура металлизации исходного образца слоистая, а в пленке Ti содержится до 10% углерода и 15% кислорода. В области границы раздела Ti-n⁺Si имеется сформированный за счет взаимного массопереноса переходной слой. БТО приводит к разрушению слоистой структуры контакта — происходит существенное обогащение пленки Ti кремнием, выход кремния на поверхность пленки Au

и проникновение Au в приповерхностную область Si. При этом практически весь слой металлизации содержит силицид титана, что соответствует данным [5] о формировании TiSi при T=500°C. Поскольку исходные слои Au и Ti имели толщину по 500 Å каждый, выбранного режима БТО оказалось достаточно для образования силицидной фазы титана во всем объеме контактообразующего слоя.

Из приведенных на рис. 2 и 3 профилей распределения компонентов и рентгенодифрактограмм слоя Au-Ti-Pd₂Si-n⁺Si-контакта видно, что силицидная фаза Pd имеется в исходном образце, т. е. возникает уже в процессе напыления, а термообработка существенно не влияет на состав металлизации. При этом как в исходном, так и в прошедшем ТО образцах переходная область на границе раздела металла с Si обогащена атомами Ti и Pd в присутствии углерода и кислорода, а профиль распределения Au после ТО практически не изменяется.

Судя по приведенным данным такая металлизация омических контактов должна формировать тесный контакт силицидов палладия с Si. Как и ожидалось,

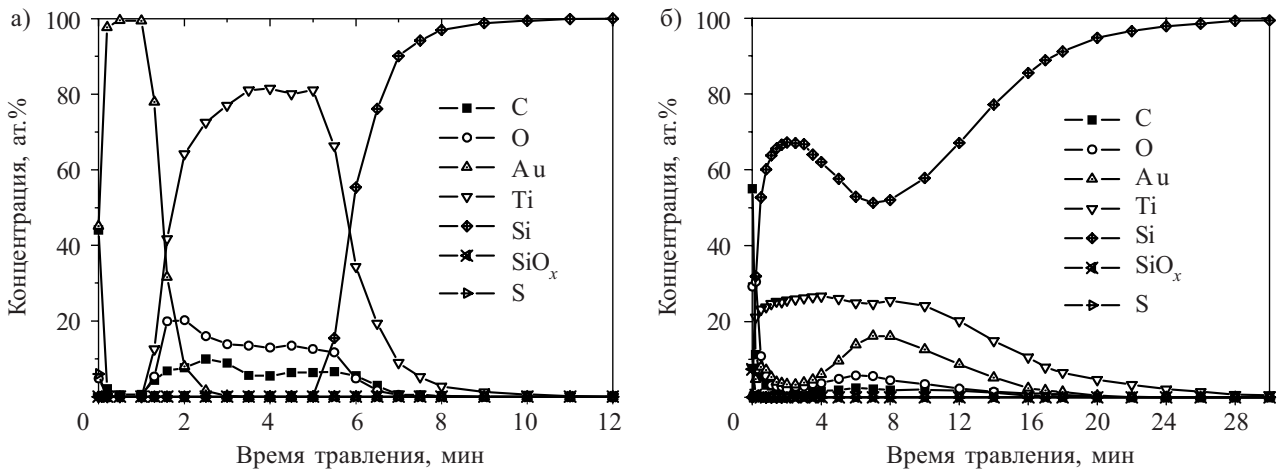


Рис. 1. Профили распределения компонентов в контактном слое Au-Ti-n⁺Si: а — исходный образец; б — после БТО при T=500°C, τ=60 с

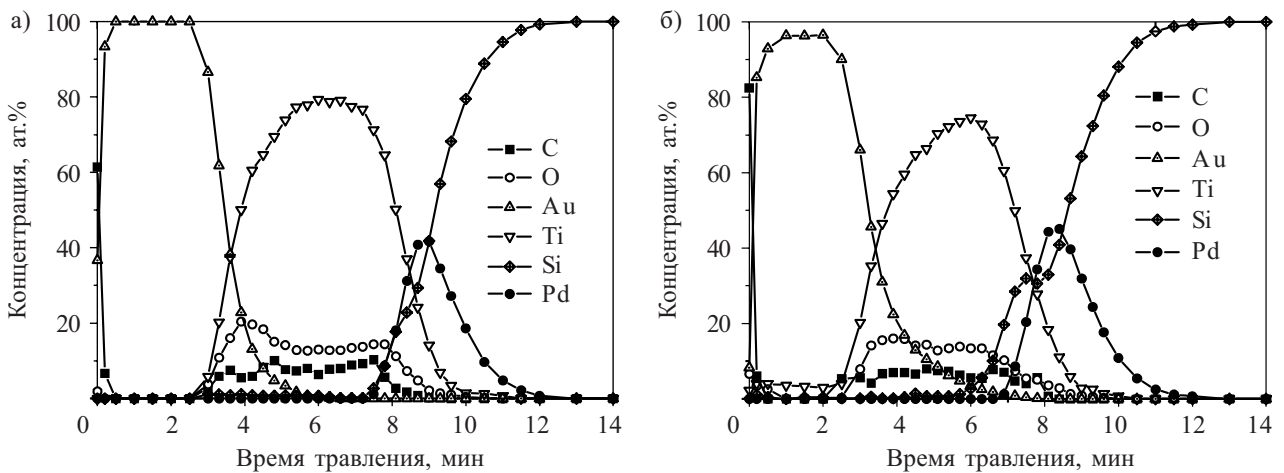


Рис. 2. Профили распределения компонентов в контактном слое Au-Ti-Pd₂Si-n⁺Si: а — исходный образец; б — после ТО при T=450°C, τ=10 мин

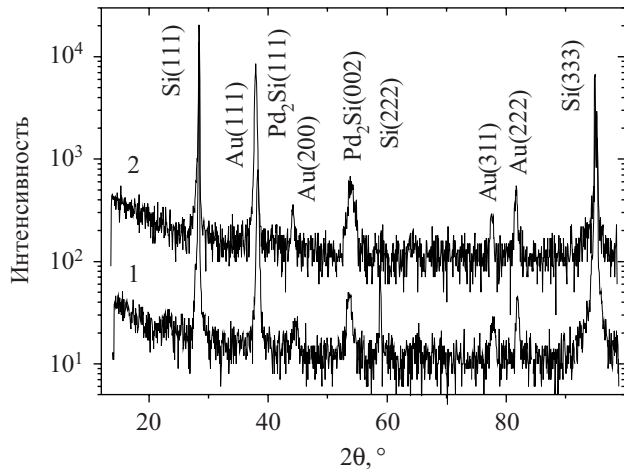


Рис. 3. Рентгенодифрактограммы контактной металлизации Au–Ti–Pd₂Si–n⁺Si: 1 — исходный образец; 2 — после ТО при T=450°C, τ=10 мин

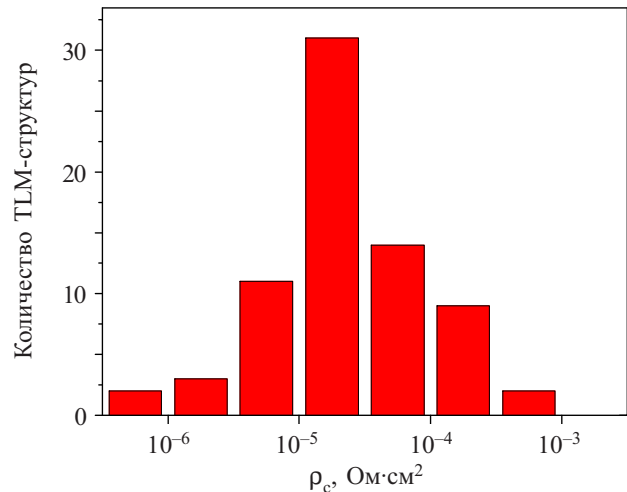


Рис. 5. Распределение значений ρ_c на пластине с TLM-контактами Au–Ti–Pd₂Si–n⁺⁺–n⁺–Si, напыленными на нагретую до 330°C подложку

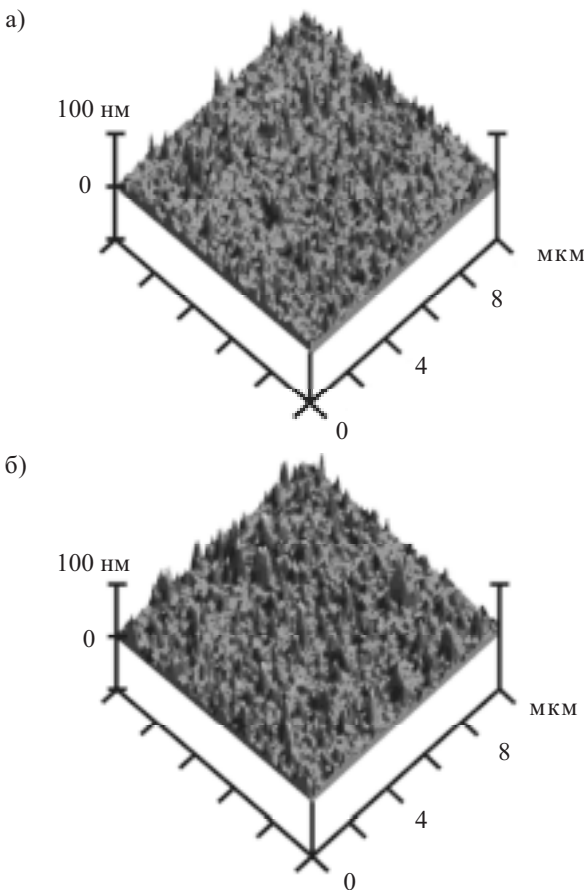


Рис. 4. Морфология поверхности n⁺Si после удаления контактной металлизации Au–Ti–Pd₂Si–n⁺Si методом ионного травления: а — исходный образец; б — после ТО при T=450°C, τ=10 мин

исходные омические контакты Au–Ti–Pd₂Si–n⁺Si, напыленные на нагретую до 330°C подложку n⁺Si, имели сравнительно низкие значения сопротивления (ρ_c=(1,2–2,3)·10⁻⁴ Ом·см²). Их отжиг при 450°C и при 500°C привел к уменьшению ρ_c до 10⁻⁵–10⁻⁶ Ом·см² за счет завершения образования Pd₂Si

во всем объеме контактообразующего слоя и обогащения его кремнием.

На рентгенограммах рис. 3 видны рефлексы от подложки Si, пленки Au, а также фазы Pd₂Si. Изменность фазового состава свидетельствует о том, что сформированная при напылении металлизации фаза Pd₂Si остается стабильной и не взаимодействует с пленкой Au при последующем отжиге. Это подтверждается приведенными на рис. 4 микрофотографиями поверхности кремния после удаления слоев металлизации — здесь видно, что после ТО морфология поверхности практически не изменилась.

Отсутствие на рентгенодифрактограммах рефлексов, связанных с титаном, свидетельствует, по-видимому, об аморфизированном (мелкодисперсном) состоянии этого компонента, сохраняющего металлическую проводимость, поскольку величина ρ_c после ТО не увеличилась.

Следует отметить, что такого же порядка величины ρ_c можно получить без ТО при изготовлении данной контактной металлизации на нагретой до 330°C подложке с n⁺⁺–n⁺–структурой Si, полученной диффузией фосфора до уровня легирования 2,5·10²⁰ см⁻³ в n⁺–подложку Si с уровнем легирования 3·10¹⁹ см⁻³, (рис. 5).

Несколько иначе ведет себя контактная металлизация Au–Ti–n⁺Si. Несмотря на то, что температура подложки при напылении составляет 400°C, силицидная фаза титана в исходном образце не возникает. ВАХ исходного контакта носит барьерный характер. После БТО при T=500°C контакт становится омическим с ρ_c≈(0,5–1)·10⁻⁴ Ом·см², что связано, по-видимому, с образованием силицида титана и находится в соответствии с данными [5].

Таким образом, для создания низкоомного (ρ_c≤10⁻⁵ Ом·см²) омического контакта к импульсным Si микроволновым диодам без применения термообработки можно использовать металлизацию, включающую слой Pd, напыленного на нагретую до 330°C

подложку Si, содержащую легированный фосфором до 10^{20} см⁻³ слой n^{++} -Si. Сформированные таким способом омические контакты, включающие Au-Ti-Pd₂Si-металлизацию, не деградируют в результате быстрого термического отжига при 400°C и при 500°C в течение 60 с и способны выдерживать такие кратковременные температурные перегрузки.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Лабунов В. А., Борисенко В. Е., Заровский Д. И. и др. Формирование силицидов импульсной обработкой пленочных структур // Зарубежная электронная техника.— 1985.— № 8.— С. 27—53.
2. Мьюрарка Ш. Силициды для СБИС.— М.: Мир, 1986.
3. Борисенко В. Е. Твердофазные процессы в полупроводниках при импульсном нагреве.— Минск: Наука и техника, 1992.
4. Качурина Е. Е., Мьякиненков В. И., Щеллова В. В. Силициды тугоплавких металлов в технологии полупроводниковых приборов и интегральных схем // Обзоры по электронной технике. Сер. 2. Полупроводниковые приборы.— М.: ЦНИИ «Электроника», 1982.— Вып. 7 (903).— С. 3—39.
5. Гершинский А. Е., Ржанов А. В., Черепов Е. И. Тонкопленочные силициды в микроэлектронике // Микроэлектроника.— 1982.— Т. 11, № 2.— С. 83—94.
6. Boltovets N. S., Goncharuk N. M., Krivutsa V. A. et al. Contacts for silicon IMPATT and pick-off diodes // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics.— 2000.— Vol. 3, N 3.— P. 352—358.