

ФОТОДИОД НА ОСНОВЕ ПЕРЕХОДА МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК, СОВМЕСТИМЫЙ С КРЕМНИЕВОЙ ТЕХНОЛОГИЕЙ

Ю. С. Емельяненко¹, М. И. Маркевич¹, А. М. Чапланов¹, В. В. Колос²,
С. В. Адашкевич³, В. Ф. Стельмах³, Ч. Карват⁴, П. Жуковский⁴

¹Физико-технический институт НАНБ

²ОАО «Интеграл»

³Белорусский государственный университет, stelmach@bsu.by

⁴Люблинский технический университет

В технологии производства фотоприемников и других оптоэлектронных приборов известны фотодиоды на основе $p-n$ -перехода, сформированного в монокристалле полупроводника, например, кремния или германия [1], спектральная чувствительность которых определяется шириной запрещенной зоны полупроводника и рекомбинационными процессами фотовозбужденных носителей заряда на поверхности полупроводника. Фотодиоды [1] снабжены омическими контактами к p - и n -областям полупроводника и обычно эксплуатируются при обратном смещении. Достижение в фотодиодах [1] высоких значений параметров быстродействия и спектральной фоточувствительности ограничивается жесткими требованиями к технологии изготовления и качеству монокристаллических полупроводников. Известны также фотодиоды на основе гетеропереходов между монокристаллическими широкозонным и узкозонным слоями полупроводников [2], обеспечивающие расширение спектральной фоточувствительности. Вместе с тем, фотодиоды [2] отличаются сложной технологией изготовления, трудностями ее совмещения с современной кремниевой технологией интегральных микросхем и ограниченным быстродействием. Фотодиоды на переходе металл-полупроводник [3], содержащие прозрачный металлический электрод, например, на основе тонкой золотой пленки, расположенный на слое монокристаллического полупроводника, образующий выпрямляющий переход (барьер Шоттки), а также второй электрод, расположенный на противоположной стороне слоя полупроводника и образующий с ним омический контакт. Они отличаются повышенными по сравнению с фотодиодами [1, 2] спектральной чувствительностью и быстродействием, но структура и технология производства чувствительна к режимам технологических операций и качеству материалов, а также несовместимы с кремниевой технологией интегральных микросхем.

Важной задачей является создание фотодиодов, совместимых с кремниевой технологией интегральных микросхем при сохранении повышенных значений спектральной чувствительности и быстродействия.

Научной основой создания таких фотодиодов являются обнаруженные авторами полупроводниковые свойства тонкой поликристаллической пленки дисилицида титана ($TiSi_2$) модификации С49 (рис. 1) [4], в отличие от известного свойства металлической проводимости дисилицида титана модификации С54 [5], используемого в кремниевой технологии для создания электрических соединений между элементами субмикронных размеров.

Существенным преимуществом дисилицида титана обеих модификаций является их технологическая совместимость с технологией производства современных кремниевых интегральных микросхем, в том числе и с субмикронными размерами эле-

ментов. Это обеспечивает возможность использования обнаруженных полупроводниковых свойств, в том числе свойства фотопроводимости (рис. 2) [6], в хорошо отработанных режимах и на оборудовании, используемом в современной электронной промышленности.

На рисунке 3 схематически представлена структура фотодиода, использующего слой полупроводника толщиной 70 нм на основе поликристаллической полупроводниковой пленки дисилицида титана модификации С49. Из рис. 3 видно, что слой полупроводника 1 расположен на кремниевой подложке 2. На внешней стороне слоя полупроводника 1 расположен прозрачный металлический электрод 3 на основе тонкой (10 нм) пленки золота (Au), образующей с ней выпрямляющий переход (барьер Шоттки), а между второй стороной слоя полупроводника 1 и кремниевой подложкой 2 расположен второй электрод 4 на основе приповерхностного слоя кремниевой под-

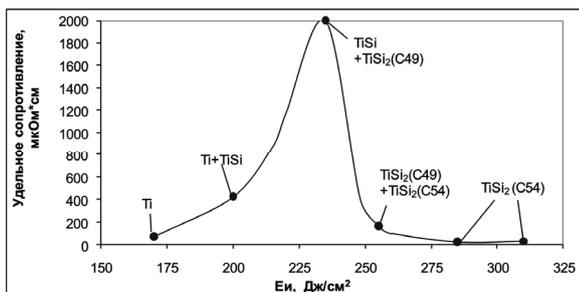


Рис. 1. Диаграмма изменения удельного сопротивления и фазового состава пленок $TiSi_x$ в зависимости от плотности энергии (E_i) при ИФО

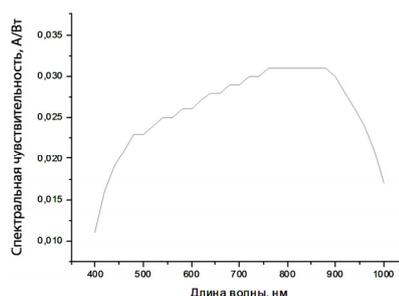


Рис. 2. Спектральная чувствительность гетероструктуры $Au/TiSi_2(C49)/Si_{n-типа}/S$

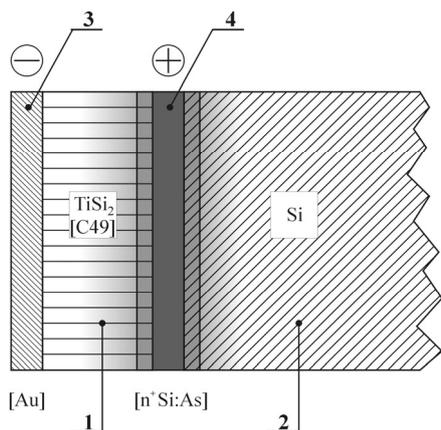


Рис. 3. Структура фотодиода

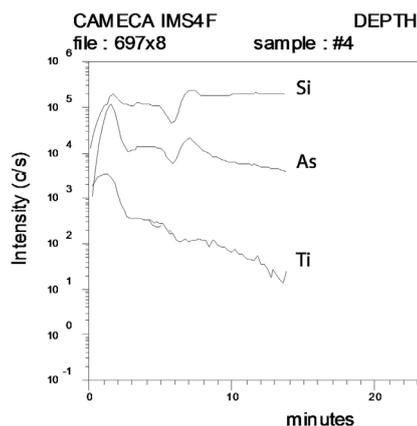


Рис. 4. Распределение элементов в системе $TiSi_x$ – кремний, имплантированный As, полученное методом вторично-ионной масс-спектрометрии после быстрой термической обработки

ложки, легированной мышьяком, образующий со слоем полупроводника 1 омический контакт (рис. 4). При оптических измерениях к электродам 2 и 4 обычно подключается электрическое напряжение обратной полярности, как показано на рис. 3.

Фотодиод работает следующим образом. При освещении слоя полупроводника *1* основная часть квантов света проникает, как и в фотодиоде [3], через металлический электрод *3*, поскольку его толщина мала (около 10 нм для Au). Кванты света с энергией большей ширины запрещенной зоны слоя полупроводника *1*, для которых он не прозрачен, поглощаются и возбуждают фотоносители заряда, увеличивающие ток обратно смещенного перехода. В данном фотодиоде сохраняются преимущества фотодиодов [3] по возможности регистрации квантов света в расширенном спектральном диапазоне и по быстродействию, поскольку сопротивление базы фотодиодов на основе переходов металл-полупроводник намного меньше, чем у фотодиодов [1–2].

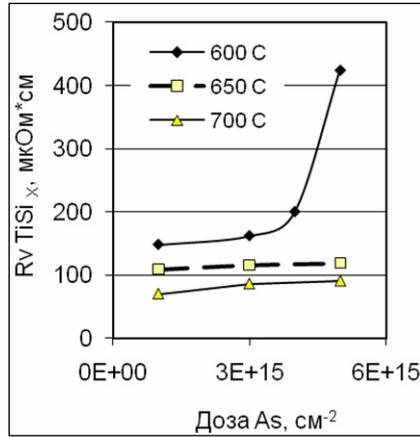


Рис. 5. Зависимость сопротивления структур TiSi₂ от дозы имплантации мышьяка и температуры быстрой термической обработки

Вместе с тем, в отличие от фотодиода [3] существенно, что благодаря новому конструктивному решению второго электрода *4* в виде приповерхностного слоя кремниевой подложки *2*, легированной мышьяком до пороговой концентрации $2 \div 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (рис. 5) с помощью ионной имплантации и термической активации донорной примеси As, формируется тонкий сильнолегированный слой кремния *n*⁺-типа. Это обеспечивает получение омического контакта электрода *4* с требуемым низким электрическим сопротивлением, но со структурой и на основе операций, характерных для кремниевой технологии.

Следует отметить, что благодаря использованию слоя атомов мышьяка с большим ковалентным радиусом и поверхностной концентрацией

$2 \div 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (рис. 5), соизмеримой с поверхностной концентрацией атомов Si на поверхности монокристаллической кремниевой подложки, обеспечивается оптимальный технологический режим формирования полупроводникового слоя TiSi₂ требуемой модификации С49 с требуемой структурой зерен. Это обеспечивается тем, что процесс синтеза пленки TiSi₂, осуществляемый на основе взаимной диффузии атомов Si в предварительно нанесенную на кремниевую подложку пленку титана, который осуществляется за счет операции быстрой термической обработки через сильнолегированный слой из атомов As. Благодаря этому слой из атомов мышьяка выполняет особую функцию ограничения диффузии атомов Si в Ti и Ti в Si. В результате обеспечивается контролируемое зарождение островков TiSi₂ модификации С49 на границе раздела кремниевая подложка-пленка титана, дальнейший контролируемый рост островков и формирование на их основе столбчатой структуры TiSi₂ только модификации С49 и подавление образования модификации С54 [7]. При этом также существенно, что полупроводниковая поликристаллическая пленка TiSi₂ состоит из массива поликристаллов столбчатой формы только модификации С49 с повышенной атомной плотностью у их основания за счет начальных условий их формирования и дополнительного подлегирования атомами мышьяка, а также с пониженной атомной плотностью у их вершин (со стороны верхнего электрода). Благодаря этому ширина энергетической зоны в торцевой части слоя полупроводника *1* у

электрода 3 больше, нежели у нижнего слоя полупроводника 1 у электрода 4. Вследствие этого, в отличие от фотодиода [3], сформированный слой полупроводника 1 является структурой с переменной шириной запрещенной зоны, что обеспечивает дополнительное расширение спектральной чувствительности данного фотодиода от 0,3 мкм до 1,2 мкм (рис. 2).

Более того, наличие в слое TiSi_2 у границы электрода 4 градиента в распределении донорных атомов As, возникшего вследствие их частичной диффузии из области электрода 4 при быстрой термической обработке, приводит к образованию в слое полупроводника 1 ускоряющего фотоэлектроны внутреннего электрического поля из ионизированных атомов As^+ . Это обеспечивает дополнительное, по сравнению с [3], повышение быстродействия фотодиода до значений 0,01 нс.

Таким образом, совместимость предложенного фотодиода с кремниевой технологией интегральных микросхем при повышенных значениях спектральной чувствительности и быстродействия достигается благодаря формированию фотодиода на кремниевой подложке с использованием в своей структуре как самого кремния, так и отработанных в кремниевой технологии операций и средств диагностики их режимов, а сам фотодиод может интегрироваться в состав кремниевой оптоэлектронной микросхемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пасынков, В. В. Полупроводниковые приборы: Учеб. для вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики» и «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы» 4-е изд. перераб. и доп. / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. М.: Высш. шк. 1987. 479 с.
2. Циуляну, Д. И. Гетеропереходный фотоприемник / Д. И. Циуляну, Э. П. Коломейко, С. А. Малков, О. Н. Мельник. Патент РФ № 2069921. Дата опубл. 27.11.1996. № заявки 92004994/25.
3. Анисимова, И. Д. Фотоприемники ультрафиолетового диапазона на основе широкозонных соединений A_3B_5 / И. Д. Анисимова, В. И. Стафеев // Журн. «Прикладная физика». 1999. № 2. С. 20.
4. Стельмах, В. Ф. Влияние импульсной фотонной обработки на свойства системы TiN/Ti/Si / В. Ф. Стельмах [и др.] // Электроника инфо. 2008. № 9. С. 55.
5. Стельмах, В. Ф. Контактные системы на основе силицидов / В. Ф. Стельмах [и др.] // Электроника инфо. 2009. № 7. С. 66.
6. Стельмах, В. Ф. Использование полупроводниковых свойств некоторых модификаций силицидов титана, полученных методом быстрой термической обработки, для создания фотоприемников / В. Ф. Стельмах // Оптический журнал. 2010. № 8. Принято к печати.
7. Колос, В. В. Формирование дисилицида титана в системе TiN/Ti/Si при БТО / В. В. Колос, М. И. Маркевич, В. Ф. Стельмах, А. М. Чапланов // Вести НАНБ. 2010. № 4. Принято к печати.