

## Исследование свойств структур карбид кремния на кремнии и карбид кремния на изоляторе в условиях открытого космического пространства

Ю.Н. Горелов, А.В. Щербак, Л.В. Курганская, Д.Ю. Голубева

Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева  
443086, Российская Федерация, г. Самара  
Московское шоссе, 34

Рассмотрены вопросы исследования стойкости полупроводниковых приборных структур к действию факторов открытого космического пространства. Показана необходимость комплексного исследования электрофизических параметров полупроводниковых слоев в течение космического полета. Предложены образцы приборных структур, позволяющие исследовать влияние факторов космического пространства на удельное сопротивление полупроводникового слоя, на свойства контактов металл – полупроводник, на состояние границы диэлектрик – полупроводник. Рассмотрены методы измерения удельного сопротивления, контактного сопротивления, коэффициента Холла, вольтамперных и вольт-фарадных характеристик образцов приборных структур. Предложены схемы измерения перечисленных параметров, адаптированные для работы в составе автоматических измерительных систем.

*Ключевые слова:* карбид кремния, приборные структуры, электрофизические параметры, космический эксперимент.

### Введение

Развитие космической техники связано с широким использованием современных достижений в области разработки и производства радиационно-стойких электронных компонентов. Одним из наиболее перспективных полупроводниковых материалов для производства таких компонентов является карбид кремния (SiC), который по основным параметрам: ширине запрещенной зоны, теплопроводности, допустимой температуре, скорости дрейфа электронов значительно превосходит традиционные полупроводниковые материалы, такие как кремний, германий, арсенид галлия. Карбид кремния имеет высокую термо- и радиационную устойчивость, большую механическую прочность, очень малую скорость диффузии и самодиффузии примесей, очень слабую химическую активность, что обусловлено высокой энергией связи в решетке карбида кремния (5 эВ) [1–5]. Благодаря совокупности вышеперечисленных свойств этот материал является наиболее перспективным в области разработки приборов для силовой быстродействующей электроники, СВЧ электроники повышенной мощности [6; 7], оптоэлектроники [8], микросистемной техники [9–12], а также в области разработки различных датчиков, предназначенных для работы в экстремальных условиях: при

повышенных температурах, под воздействием агрессивных сред, под воздействием радиации, в условиях открытого космического пространства [13–16].

В последнее время наблюдается интенсивное изучение пленочных структур карбида кремния [18–20], на основе которых могут быть реализованы различные типы датчиков физических величин (температуры, давления, освещенности, радиации, магнитного поля, мультифункциональные и т. п.), предназначенных для установки на внешней поверхности космических аппаратов (КА). Такие датчики позволят получать оперативную информацию как о внешних условиях космического полета, так и о состоянии элементов конструкции КА, находящихся в открытом космосе.

В связи с этим исследование стойкости тонкопленочных приборных структур на основе карбида кремния к воздействию факторов открытого космического пространства является актуальной задачей.

### 1. Приборные структуры и задачи их исследования в условиях открытого космического пространства

Приборные структуры представляют собой совокупность слоев из полупроводниковых, диэ-

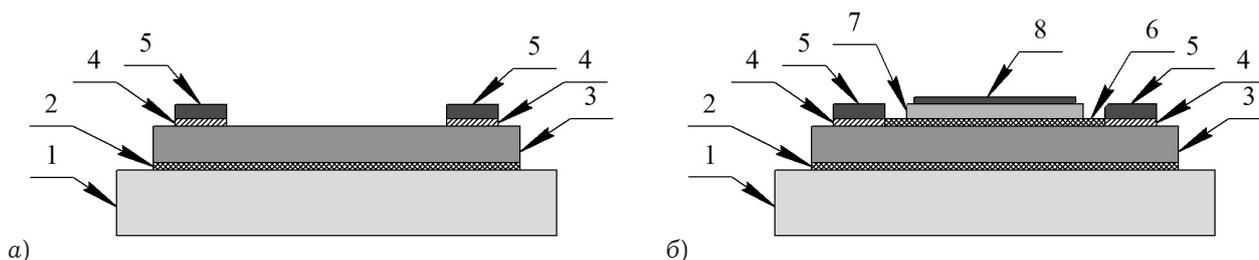


Рис. 1. Тонкопленочные приборные структуры для датчиков физических величин: а) полупроводниковый слой на подложке; б) МДП структура

лектрических и металлических материалов, нанесенных в определенном порядке друг на друга. На рис. 1, а показано поперечное сечение тонкопленочной структуры, которая представляет собой подложку (1) с нанесенным на нее тонким слоем полупроводникового материала (3) с металлическими токопроводящими контактами (5). Функцию преобразования измеряемой величины в электрический сигнал выполняет полупроводниковый слой. Такие структуры являются основой для различных типов чувствительных элементов: термочувствительных, тензочувствительных, мультифункциональных и т. д.

Структуры металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) широко используются в современной микроэлектронике, на их основе созданы полевые транзисторы с изолированным затвором, приборы с зарядовой связью, цифровые интегральные схемы. МДП структуры также используются для создания датчиков химического состава, зарядочувствительных и мультифункциональных сенсоров. Поперечное сечение тонкопленочной МДП структуры показано на рис. 1, б. Структура содержит подложку (1), слой полупроводника (3), слой подзатворного диэлектрика (7), металлический затвор (8), металлические токопроводящие контакты к полупроводнику (5), межфазные границы: подложка-полупроводник (2), металлический контакт-полупроводник (4), диэлектрик-полупроводник (6).

Надежность и стабильность работы датчиков, а также их стойкость к внешним воздействующим факторам зависят как от свойств самого полупроводникового слоя, так и от качества межфазных границ между полупроводником и подложкой (2) и между металлическими контактами и полупроводником (4), а также между диэлектриком и полупроводником (6) (см. рис. 1, а и б).

Электронные компоненты (датчики), устанавливаемые на внешней поверхности космических аппаратов (КА), в течение всего срока службы находятся под воздействием факторов открыто-

го космического пространства (ОКП), к которым относятся:

- воздействие низких (до минус 150 °С) и высоких (до плюс 150 °С) температур;
- космический вакуум (от  $10^{-4}$  до  $10^{-15}$  Па);
- ионизирующее излучение;
- космическая плазма;
- невесомость.

Указанные факторы вызывают необратимые изменения в параметрах составляющих слоев и межфазных границ тонкопленочных датчиков, что ведет к изменению их характеристик и полному отказу. Рассмотрим влияние факторов ОКП на тонкопленочные структуры.

Изменения температуры структуры сопровождаются возникновением механических напряжений в пленке, которые могут привести к грубым нарушениям ее структуры: растрескиванию, частичному или полному отслаиванию от подложки. Такие дефекты обнаруживаются визуально после возвращения спускаемого аппарата (СА). Если во время полета пропускать через структуру электрический ток, то разрушение пленки можно определить по обрыву электрической цепи, которое сопровождается резким необратимым возрастанием электрического сопротивления.

Под воздействием повышенных температур пленка может испаряться в вакуум, в результате чего постепенно изменяется ее толщина. Электрическое сопротивление пленки зависит от ее толщины, следовательно, испарение материала пленки будет сопровождаться постепенным необратимым увеличением сопротивления.

Действие ионизирующего излучения космического пространства на полупроводниковую структуру приводит к образованию в полупроводниковой пленке глубоких центров акцепторной или донорной природы. В результате проводимость полупроводника уменьшается и при больших дозах облучения полупроводник может стать изолятором. Для описания этого процесса

используется такой параметр, как скорость удаления носителей  $V_d$  [21]:

$$V_d = \Delta n / D = (n_0 - n) / D,$$

где  $n_0$  и  $n$  – концентрации носителей в зоне проводимости до и после облучения;  $D$  – доза облучения.

Обнаружить изменение концентрации свободных носителей заряда можно путем одновременного определения удельного сопротивления полупроводника и постоянной Холла.

Влияние космической плазмы выражается в приобретении космическим аппаратом электростатического заряда, причем распределение заряда не равномерно, в результате чего отдельные элементы конструкции КА имеют разные электрические потенциалы. Электрические поля, возникающие между элементами КА, могут вызвать перераспределение носителей заряда в полупроводниковых пленках, находящихся на его поверхности. В МДП структурах электростатические поля могут привести к пробое подзатворного диэлектрического слоя. Зарядовое состояние поверхности структур влияет на их вольт-фарадные характеристики. Таким образом, регистрация вольт-фарадных характеристик МДП структур в течение космического полета позволит получить информацию о влиянии факторов ОКП на зарядовое состояние границы раздела диэлектрик-полупроводник и в конечном счете идентифицировать процессы, происходящие вблизи межфазных границ исследуемой структуры.

Особого внимания заслуживает исследование стойкости омических контактов к различным областям структуры, так как физическая деградация контактов ограничивает область применения того или иного прибора. Состояние контактов характеризуется значением переходного сопротивления и коэффициентом выпрямления, последний можно определить с помощью вольт-амперных характеристик.

Таким образом, комплексное исследование влияния факторов ОКП на полупроводниковые структуры требует измерения и регистрации в течение полета следующих параметров и характеристик:

- электрического сопротивления;
- подвижности носителей заряда;
- концентрации носителей заряда;
- вольт-фарадных характеристик;
- вольт-амперных характеристик.

## 2. Образцы тонкопленочных структур и методы исследования

В лабораторных условиях для измерения параметров и характеристик полупроводниковых структур широко используются зондовые методы, основанные на явлении растекания тока в точке контакта острия зонда с полупроводником [22; 23]. Зондовые методы позволяют измерять удельное сопротивление полупроводниковых слоев, а также проводить исследование эффекта Холла. Основным достоинством зондовых методов является отсутствие необходимости изготовления контактов к исследуемым образцам, что позволяет не только определять удельное сопротивление образцов, но и исследовать пространственное распределение удельного сопротивления. Однако, использование обычных зондов в виде прижимных контактов для проведения измерений на борту КА невозможно, так как под действием вибраций и ударных нагрузок, возникающих во время выведения и спуска КА, зонды повредят полупроводниковый слой. Следовательно, для измерения параметров полупроводников на борту КА необходимо использовать образцы структур с определенной топологией, позволяющей свести к минимуму шунтирующее действие металлических контактных площадок.

В настоящее время известно достаточно много различных типов образцов, отличающихся конфигурацией, которые используются для измерения удельного сопротивления, ЭДС Холла и магнетосопротивления [24]. На практике обычно используются образцы двух видов: узкие прямоугольные с отношением длины к ширине более 3, и образцы Ван-дер-Пау (почти квадратные или круглые). Каждый из этих видов имеет свои преимущества и недостатки.

Образцы Ван-дер-Пау, как правило, используются для измерения удельного сопротивления и коэффициента Холла однородных по толщине полупроводниковых пластин [25]. Для проведения измерений требуется, чтобы образец имел четыре точечных омических контакта, расположенных на торцах пластины. Для нахождения удельного сопротивления, коэффициента Холла и холловской подвижности носителей заряда требуется знать только толщину образца. Это является основным достоинством метода. К недостаткам относится то, что размер контактов и их расположение (при измерении коэффициента Холла) существенно снижают точность резуль-

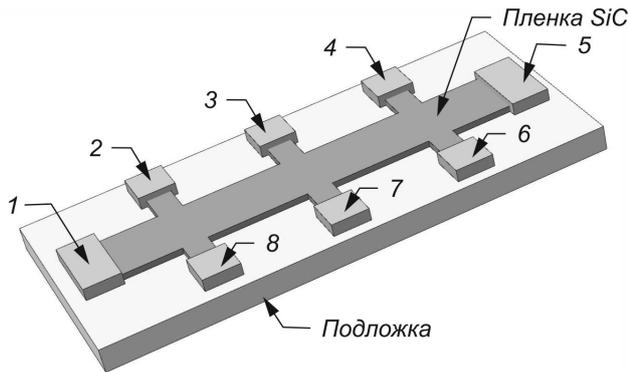


Рис. 2. Прямоугольный 8-контактный образец с отводами для измерения ЭДС Холла и удельного сопротивления

татов, особенно если контакты наносятся не на торцы, а на поверхность образцов, например, при исследовании тонкой пленки на подложке. Таким образом образцы Ван-дер-Пау не подходят для исследования тонкопленочных структур.

Прямоугольные узкие образцы хорошо подходят как для измерения удельного сопротивления полупроводника, так и для измерения коэффициента Холла и холловской подвижности носителей заряда. Для измерения всех перечисленных величин наилучшим образом подходят восьмиконтактные прямоугольные образцы с отводами [26], общий вид которых, показан на рис. 2.

Исследуемый слой карбида кремния имеет форму узкой полоски с отводами. На противоположных концах полоски нанесены контакты 1 и 5, предназначенные для пропускания тока через образец при измерении удельного сопротивления полупроводниковой пленки, переходного сопротивления омических контактов, а также при измерении ЭДС Холла. Ширина контактных площадок 1 и 5 должна быть больше ширины полупроводниковой полоски для равномерного распределения тока по ее ширине. На концах отводов нанесены контактные площадки 2, 3, 4, 6, 7, 8 для измерения потенциалов в соответствующих сечениях вдоль полоски. Топология образца показана на рис. 3, а.

Так как полупроводниковая полоска однородна по ширине, толщине и составу, то распределение потенциала вдоль нее будет описываться линейной функцией:

$$\varphi(x) = \frac{\rho x}{bd} = \rho_S \frac{x}{b}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление полупроводника;  $\rho_S$  – поверхностное сопротивление пленки;  $b$  – ширина полоски;  $d$  – толщина слоя полупроводника;  $x$  – расстояние вдоль полоски от

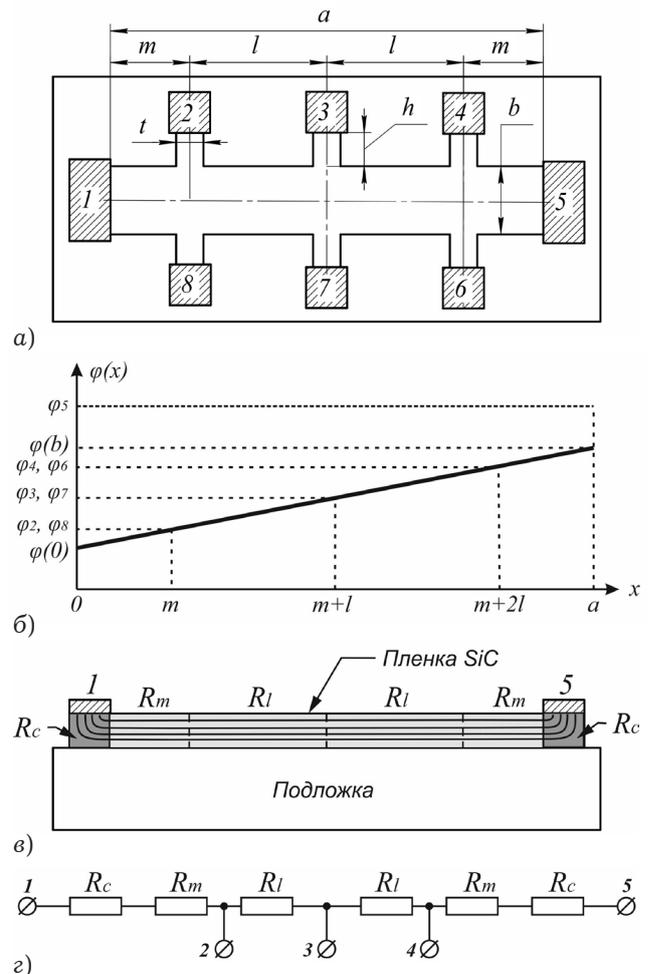


Рис. 3. 8-контактный образец: а) топология образца; б) распределение потенциала вдоль образца; в) распределение тока по толщине пленки SiC; г) эквивалентная схема образца для измерения удельного и контактного сопротивления

контакта 1 (рис. 3, б), за исключением областей под контактными площадками 1 и 5 и в непосредственной близости от них (см. рис. 3, в). Однако, учитывая тот факт, что толщина пленки должна быть много меньше линейных размеров самой полоски, можно считать, что распределение тока неоднородно только под металлическими контактами. Тогда, учитывая распределение потенциала (1), для разности потенциалов между контактами 2 и 4 справедлива формула:

$$\varphi_4 - \varphi_2 = U_{42} = I_{15} \rho_S \frac{2l}{b}, \quad (2)$$

откуда поверхностное и удельное сопротивления соответственно равны:

$$\rho_S = \frac{b}{2l} \frac{U_{42}}{I_{15}}; \quad \rho = \rho_S d. \quad (3)$$

Для определения контактного сопротивления  $R_c$  удобно воспользоваться эквивалентной схемой образца (см. рис. 3, г). Разность потенциалов между контактами 1 и 2 равна:

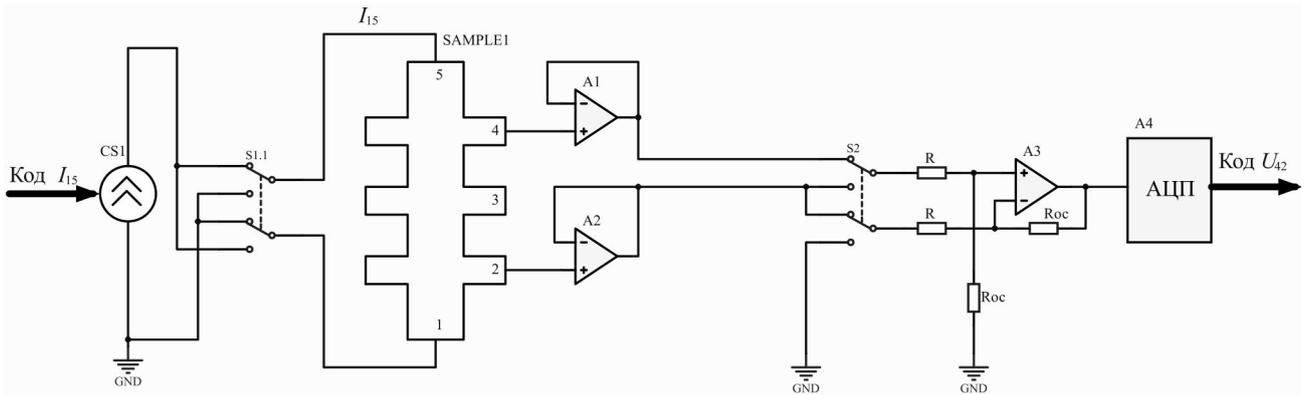


Рис. 4. Схема измерения удельного сопротивления

$$U_{21} = I_{15}(R_c + R_m),$$

где  $R_m = \rho_S m / b$ , а разность потенциалов между контактами 2 и 3 равна:

$$U_{42} = 2I_{15}R_l,$$

где  $R_l = \rho_S l / b$ , откуда, при учете, что  $R_m = R_l m / l$ , получаем:

$$R_c = \frac{U_{21}}{I_{15}} - \frac{m}{2l} \frac{U_{42}}{I_{15}}. \quad (4)$$

Схема измерения значений удельного и контактного сопротивления показана на рис. 4. Образец питается током  $I_{15}$  от программируемого источника тока. Величина тока задается микроконтроллером. При измерении удельного сопротивления электронный переключатель **S1** должен находиться в верхнем по схеме положении (как показано на рис. 4). При этом потенциалы контактов 2 и 4 через повторители напряжения **A1** и **A2** подаются на входы дифференциального усилителя (резисторы  $R$ ,  $R_{oc}$ , операционный усилитель **A3**). На выходе дифференциального усилителя формируется сигнал, пропорциональный  $U_{42}$ , который поступает на вход аналого-цифрового преобразователя **A4**. Цифровой код, соответствующий значению  $U_{42}$  поступает на микроконтроллер, где рассчитывается поверхностное и удельное сопротивление полупроводниковой пленки по формуле (3).

Для определения контактного сопротивления  $R_c$  нужно дополнительно измерить разность потенциалов  $U_{21}$ . Для этого переключатель **S2** нужно перевести в нижнее по схеме положение. При этом потенциал контакта 2 через повторитель напряжения **A3** подается на неинвертирующий вход дифференциального усилителя, инвертирующий вход усилителя заземляется, а напряжение на выходе пропорционально значению  $U_{21}$ . После аналого-цифрового преобразования код  $U_{21}$  поступает на микроконтроллер, где

по формуле (4) вычисляется контактное сопротивление  $R_c$ .

Измерения проводятся при различных значениях и тока  $I_{15}$ , что необходимо для измерения вольт-амперных характеристик как самого слоя полупроводника, так и контактов 1 и 5. Изменение направления тока в образце осуществляется переключением электронного коммутатора **S1**.

Для измерения коэффициента Холла через контакты 1 и 5 пропускается ток  $I_{15}$ , а между контактами 3 и 7 измеряется разность потенциалов, которая равна ЭДС Холла:

$$U_H = U_{37} = \frac{R_H B I_{15}}{d},$$

откуда коэффициент Холла

$$R_H = \frac{U_{37} d}{B I_{15}}. \quad (5)$$

Здесь  $B$  – индукция магнитного поля;  $d$  – толщина образца. Холловская подвижность носителей заряда вычисляется по формуле:

$$\mu_H = \frac{|R_H|}{\rho}. \quad (6)$$

Схема измерения ЭДС Холла приведена на рис. 5. Образец питается от программируемого источника тока **CS1**. Потенциалы контактов 3 и 7 через повторители напряжения **A1** и **A2** подаются на входы дифференциального усилителя (резисторы  $R$ ,  $R_{oc}$ , операционный усилитель **A3**). Выходной сигнал дифференциального усилителя пропорционален значению ЭДС Холла. После аналого-цифрового преобразования цифровой код значения ЭДС Холла поступает на микроконтроллер, где вычисляется коэффициент Холла (5) и холловская подвижность носителей заряда (6).

Во время измерения ЭДС Холла магнитное поле создается электромагнитом, между полюсами которого находится образец. Изменение

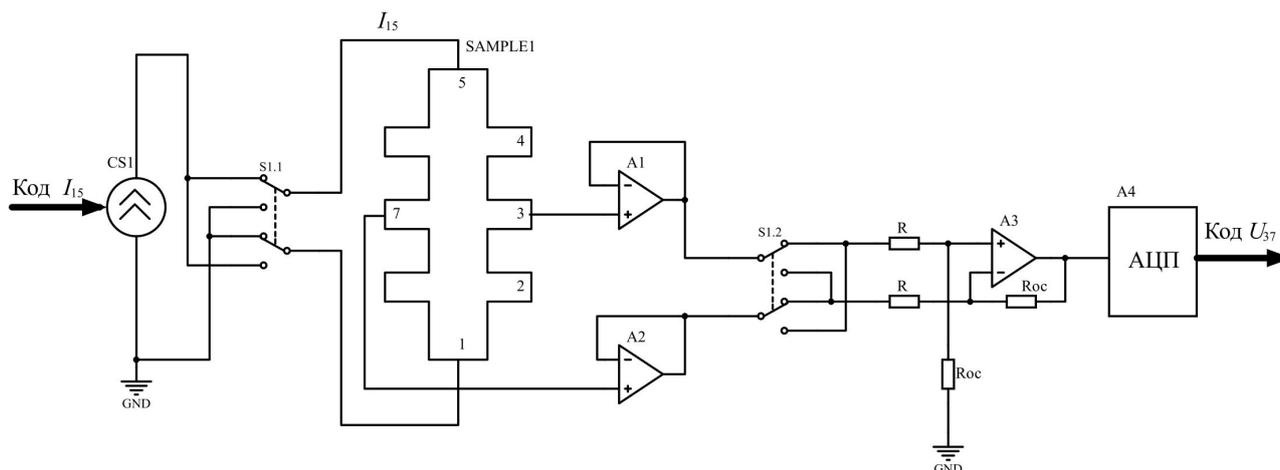


Рис. 5. Схема измерения ЭДС Холла

величины и направления магнитного поля производится путем изменения величины и направления тока в обмотке электромагнита.

### 3. Образцы МДП-структур и методы исследования

Общий вид образца МДП-структуры показан на рис. 6. Образец представляет собой слой карбида кремния, имеющий форму прямоугольника, который нанесен на подложку. Металлический контакт к полупроводниковому слою наносится по его периметру. Сверху на слой карбида кремния напыляется слой диэлектрика. На диэлектрик наносится второй металлический контакт – затвор.

Для измерения параметров МДП-структур и р-п-переходов, широкое распространение получили вольт-фарадные методы. С их помощью можно измерить концентрацию легирующих примесей, глубоких уровней и их характеристики, генерационное время неравновесных носителей заряда, плотность поверхностных состояний и их распределение по энергиям [27–29].

Вольт-фарадные методы измерения параметров полупроводников основаны на определении зависимости емкости структуры, обусловленной наличием объемного заряда в приповерхностной области полупроводника, от приложенного к ней напряжения. В основе вольт-фарадных методов измерения лежит электронная теория приповерхностной области пространственного заряда и дифференциальной поверхностной емкости.

Для измерения зависимости емкости МДП-структуры от напряжения используется схема, показанная на рис. 7.

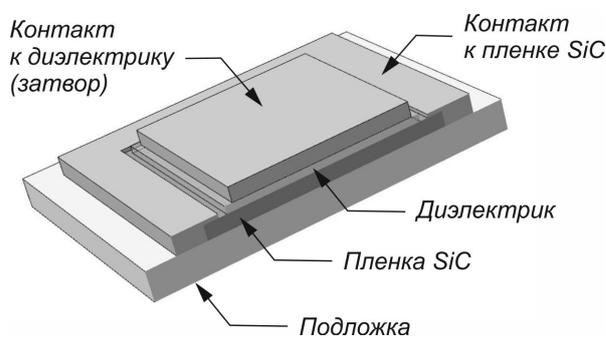


Рис. 6. Образец МДП структуры

Измеряемая емкость МДП-структуры  $C_x$  подключается к регулируемому двухполярному источнику постоянного напряжения и через разделительный конденсатор  $C_p$  к измерителю емкости (см. рис. 7). Изменяя напряжение смещения с помощью потенциометра  $P$ , и, измеряя емкость, соответствующую каждому напряжению смещения, получают экспериментальную зависимость емкости МДП-структуры от напряжения смещения – вольт-фарадную характеристику (ВФХ). Амплитуда высокочастотного (ВЧ) сигнала измерителя емкости должна быть мала по сравнению с величиной постоянного напряжения смещения. Емкость МДП-структуры также зависит от частоты ВЧ сигнала измерителя емкости. Зависимость от частоты достаточно сложная. Анализ этой зависимости позволяет идентифицировать процессы, происходящие в образце.

В настоящее время известно несколько методов измерения электрической емкости. К ним относятся: метод вольтметра и амперметра, метод сравнения (мостовой метод), метод разряда конденсатора, резонансный метод и др. [30–34]. Эти методы широко применяются в лабораторных исследованиях. Для измерения и регистрации

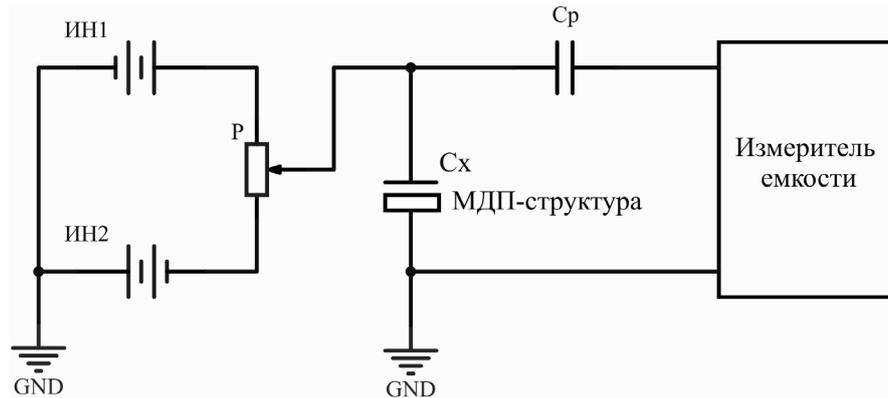


Рис. 7. Схема измерения емкости МДП-структуры

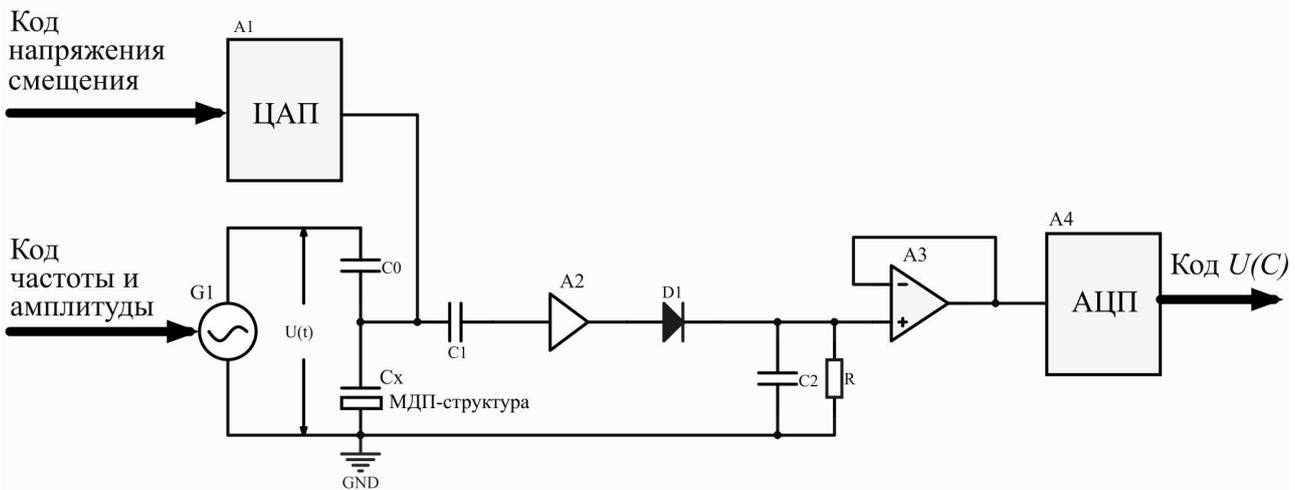


Рис. 8. Структурная схема преобразования емкости в напряжение

ВФХ во время полета необходимо иметь схему, которая в автоматическом режиме позволяет подавать смещение на исследуемый образец МДП-структуры и преобразовывать значение емкости в цифровой вид. Один из вариантов такой схемы представлен на рис. 8.

Цифро-аналоговый преобразователь А1 используется в качестве программируемого источника напряжения смещения емкости  $C_x$  МДП-структуры. Для преобразования емкости  $C_x$  в напряжение служит схема, состоящая из программируемого генератора синусоидального напряжения  $G1$ , емкостного делителя напряжения, образованного известной емкостью  $C_0$  и измеряемой емкостью  $C_x$ , разделительного конденсатора  $C1$ , усилителя переменного напряжения  $A2$ , амплитудного детектора  $D1$ ,  $C2$ ,  $R$ .

Схема работает следующим образом. Переменное напряжение от генератора  $G1$  равно  $U(t) = U_m \cos(\omega t)$  питает делитель напряжения, образованный емкостями  $C_0$  и  $C_x$ . По закону Ома амплитуда тока, текущего через делитель напряжения будет равна:

$$I = \frac{U_m}{1 / (\omega C_0) + 1 / (\omega C_x)},$$

а напряжение на конденсаторе  $C_x$  будет определяться выражением:

$$\begin{aligned} U_x &= I \frac{1}{\omega C_x} = \frac{U_m}{1 / (\omega C_0) + 1 / (\omega C_x)} \frac{1}{\omega C_x} = \\ &= \frac{U_m}{C_x / C_0 + 1} = \frac{U_m C_0}{C_x + C_0}. \end{aligned}$$

Отсюда, зная амплитуду напряжения генератора  $U_m$ , емкость  $C_0$ , и, измеряя амплитуду напряжения на измеряемой емкости  $U_x$ , можно найти значение измеряемой емкости:

$$C_x = C_0 \left( \frac{U_m}{U_x} - 1 \right). \quad (7)$$

Напряжение на емкости усиливается усилителем  $A2$  и поступает на амплитудный детектор (элементы  $D1$ ,  $C1$ ,  $R$ ). Напряжение на выходе детектора пропорционально амплитуде колебаний напряжения на измеряемой емкости. Далее выходное напряжение детектора через повторитель напряжения  $A3$  поступает на вход

АЦП А4, где преобразуется в цифровой вид. Код с выхода АЦП поступает на микроконтроллер где по формуле (7) вычисляется текущее значение емкости МДП-структуры.

### Заключение

Показана необходимость комплексного исследования влияния факторов ОКП на свойства полупроводниковых структур, перспективных для разработки приборов, функционирующих на внешней поверхности КА.

Разработан комплекс методов исследования свойств полупроводниковых структур, включающий измерение и регистрацию сопротивления, ЭДС Холла, ВФХ и ВАХ в течение космического полета.

Предложены образцы приборных структур для исследования влияния факторов открытого космического пространства на свойства полупроводниковых слоев и межфазных границ металл – полупроводник и диэлектрик – полупроводник.

Предложены схемы измерения параметров полупроводниковых структур, адаптированные для работы в составе автоматических измерительных систем.

*Исследование выполнено при поддержке субсидий ГЗН по проекту на выполнение НИР № 8.6675.2017/БЧ.*

### Список литературы

1. Лучинин В., Таиров Ю. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету // Современная электроника. 2009. № 7.
2. Лучинин В., Таиров Ю. Карбид кремния – алмазоподобный материал с управляемыми наноструктурно-зависимыми свойствами // Наноиндустрия. 2010. № 1. С. 36–40.
3. Полищук А. Полупроводниковые приборы на основе карбида кремния – настоящее и будущее силовой электроники // Компоненты и технологии. 2004. № 8.
4. Исследование толстых эпитаксиальных слоев 3С-SiC, полученных методом сублимации на подложках 6Н-SiC / А.А. Лебедев [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41. Вып. 3. С. 273–275.
5. Лебедев А., Сбруев С. SiC – электроника: прошлое, настоящее, будущее // Элементная база электроники: Электроника: наука, технология, бизнес. 2006. Вып. 5. С. 28–41.
6. Карбид кремния: технология, свойства, применение / О.А. Агеев [и др.]. Харьков: ИСМА, 2010. 532 с.
7. Мокеров В.Г. Наногетероструктуры в сверхвысокочастотной полупроводниковой электронике. М.: Техносфера, 2010. 435 с.
8. Полупроводниковые фотоэлектропреобразователи для ультрафиолетовой области спектра / Т.В. Бланк [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. Вып. 9. С. 1025–1055.
9. Чувствительные элементы высокотемпературных датчиков давления. Материалы и технологии изготовления / П.Г. Михайлов [и др.] // Известия Южного федерального университета. Серия «Технические науки». 2014. № 4(153). С. 204–213.
10. Вопросы создания высокотемпературных датчиков механических величин. Материалы, конструкции, технологии / П.Г. Михайлов [и др.] // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 4. С. 61–70.
11. Мокров Е.А., Баринин И.Н. Разработка высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. № 1.
12. Гуревич О.С., Буряченко А.Г., Ранченко Г.С. Перспективы развития датчиков давления для авиационных и общепромышленных ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. 2007. № 10.
13. An overview of high temperature electronics and sensor development at NASA Glenn research center / G.W. Hunter [et al.] // J. Turbomach. 2003. Vol. 125. № 4.
14. Katulka G.L. Micro-electromechanical systems and test results of SiC MEMS for high-g launch application // Proceedings of IEEE Sensors. USA, 2002.
15. Wright N.G., Horsfall A.B., Vassilevski K. Prospects for SiC electronics and sensors // Materials Today. 2008. Vol. 11. № 1–2.
16. SiC based pressure sensor for high-temperature environments / G. Wiczorek [et al.] // IEEE Sensors 2007 Conference. 2007.
17. Рост слитков карбида кремния политипа 4H на затравках с плоскостью (1010) / Д.Д. Авров [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2008. Т. 42. Вып. 12. С. 1483–1487.
18. Исследование толстых эпитаксиальных слоев 3С-SiC, полученных методом сублимации на подложках 6Н-SiC / А.А. Лебедев [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2007. Т. 41. Вып. 3. С. 273–275.
19. Исследование начальных стадий роста нанокластеров карбида кремния на подложке кремния / Ю.В. Трушин [и др.] // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 15. С. 48–54.
20. Ильин В.А., Матузов А.В., Петров А.С. Исследование процесса получения гетероэпитаксиальных структур 3С-карбида кремния на подложках кремния // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2008. № 4.
21. Радиационная стойкость широкозонных полупроводников (на примере карбида кремния) / А.А. Лебедев [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2002. Т. 36. Вып. 11. С. 1354–1359.
22. Батавин В.В., Концевой Ю.А., Федорович Ю.В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1985. 264 с.

23. Блад П., Ортон Дж.В. Методы измерения электрических свойств полупроводников // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. № 1. С. 3–50; № 2. С. 3–49.
24. Schroder D.K. Semiconductor Material and Device Characterization. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.
25. Chwang R., Smith B.J., Crowell C.R. Contact size effects on the van der Pauw method for resistivity and Hall coefficient measurement // Solid-State Electron. 1974. № 17. P. 1217–1227.
26. Кучис Е.В. Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. М.: Радио и связь, 1990. 264 с.
27. Шалимова К.И. Физика полупроводников; 4-е изд. СПб.: Лань, 2010. 400 с.
28. Фрейк Д.М., Ткачук Р.З. Способ емкостных исследований полупроводников с высокой диэлектрической проницаемостью // Приборы и техника эксперимента. 1986. № 3.
29. Базлов Н.В., Вывенко О.Ф., Тульев А.В. Универсальный емкостный спектрометр глубоких центров в полупроводниках и М.О.П. – структурах // Приборы и техника эксперимента. 1987. № 3.
30. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений: пер. с англ. М.: Мир, 1990. 538 с.
31. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. М.: Энергоатомиздат, 1987. 320 с.
32. Измерение электрических и неэлектрических величин: уч. пос. для вузов / под общ. ред. Евтихиева. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
33. Парусов В.П., Репьев В.Н. Цифровой прибор на основе автогенераторного преобразователя для измерения емкости при больших потерях // Приборы и техника эксперимента. 1989. № 1.
34. Пузин И.Б., Шерварлы Г.К., Нечкин С.Б. Измерение малых емкостей полупроводниковых приборов с помощью компенсационно-измерительного 2Т-моста // Приборы и техника эксперимента. 1992. № 1.

## Investigation of silicon carbide thin films properties at the open cosmos space

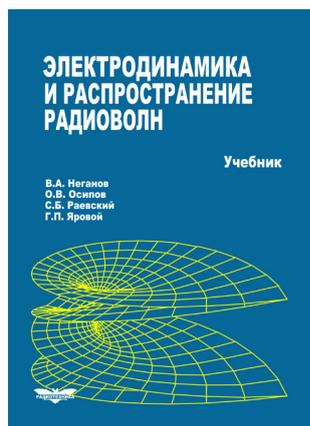
*Y.N. Gorelov, A.V. Shcherbak, L.V. Kurganskaya, D.U. Golubeva*

The problems of stability semiconductor device structures to open space conditions influence are studied. It is shown that complex investigation of electrophysical properties of semiconductor layers during the time of cosmic flight is necessary. Samples of device structures for investigation of open space conditions influence on semiconductor layer resistivity, metal-semiconductor and insulator-semiconductor interfaces properties are proposed. Methods of measuring resistivity, Hall factor, current-voltage characteristics and volt capacitive characteristics of device structures samples are considered. Measurement circuits adapted for operation with automatic measurement systems are proposed.

*Keywords:* silicon carbide, device structure, electrophysical properties, space experiment.

**Неганов, В.А.**

**Электродинамика и распространение радиоволн:** учебник / В.А. Неганов [и др.]; под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – Изд. 4-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2009. – 744 с.



ISBN 978-5-88070-154-4

УДК 537.87(075.3)  
ББК 22.3  
Н 41

Книга написана активно работающими в области электродинамики учеными. Излагаются теория электромагнитного поля с акцентом на радиотехническую электродинамику и анализ волновых процессов; рассматриваются отражение и преломление волн, излучение и дифракция; описываются основные закономерности распространения электромагнитных волн в различных безграничных средах (изотропных, анизотропных, диспергирующих, неоднородных), в направляющих и резонансных структурах, в природных условиях. Обсуждаются методы математического моделирования в электродинамике, опирающегося на применение ЭВМ.

Отличительной особенностью книги является обсуждение современных проблем электродинамики: расчет электромагнитных волн в ближних зонах излучающих структур (самосогласованный метод расчета), комплексных волн в волноведущих структурах и др.

Предназначается для студентов радиотехнических и радиофизических специальностей вузов, а также инженеров-радиотехников и радиофизиков.