

УДК 621.382

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАЗВИТИЯ СВЧ- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

© 2014 А.Н. Комов¹

Рассмотрены результаты применения полупроводниковых преобразователей на основе карбида кремния в качестве чувствительных регистраторов СВЧ-сигналов. Отмечено также, что этот материал перспективен в развитии таких областей, как медицина, аэрокосмическая техника, высокоскоростная связь. Возрастает необходимость карбида кремния для его применения в нанoeлектронике.

Ключевые слова: карбид кремния, электромагнитное излучение, радиоЭДС, температура Дебая, алмаз.

Область применения полупроводниковых приборов в последнее время значительно расширяется во многих отраслях народного хозяйства, среди которых медицина, аэрокосмическая и нефтяная промышленность, но особенно активно это происходит в военной и аэрокосмической технике.

Большое внимание развитые страны особенно уделяют разработке высокоэффективных датчиков измерения мощности непрерывных и импульсных СВЧ-сигналов, позволяющих интенсивно развивать спутниковую и межконтинентальную связь, высокоскоростной Интернет, военную разведку.

Перспективность таких датчиков — безынерционная реакция на величину и форму электромагнитного сигнала; способность сохранять физические и технологические свойства в широком интервале температур.

В качестве преобразователя СВЧ-излучения в постоянный сигнал с целью его расшифровки нашли применение полупроводниковые приборы, способные сохранять физические свойства при температурах до 1000 °С (рис. 1).

Обладая безынерционностью носителей заряда, они используются в таких направлениях, как ракетостроение, военная техника. На их базе формируется нанoeлектроника, что необходимо для развития межконтинентальной связи. Решение существующих проблем возможно при использовании хорошо развитой полупроводниковой электроники, способной к ее применению для обнаружения СВЧ-сигналов.

Необходимость использования полупроводников в качестве элементов регистрации электромагнитных сигналов обусловлена их безынерционным свойством прак-

¹Комов Александр Николаевич (Komov@mail.ru), кафедра радиофизики полупроводниковой микро- и нанoeлектроники Самарского государственного университета, 443011, Российская Федерация, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

тически для всего диапазона СВЧ-частот. К их числу принадлежат такие полупроводники, как карбид кремния и синтетические алмазы.

Структура карбида кремния формируется из содержания кристаллов (политипов), отличающихся друг от друга кристаллической структурой, и содержит 70,045 % кремния (Si) и 29,955 % углерода (C); температура плавления 2700 °С, ширина запрещенной для β -SiC \div 2,3эВ; α -SiC \div 2,9эВ; подвижность электронов U_n для β -SiC $>$ 1000 , α -SiC - 500; плотность — 3,2 г/см³.

Высокая температурная и химическая устойчивость сохранения физических свойств при продолжительном облучении определяет карбид кремния перспективным материалом для датчиков измерения СВЧ-электромагнитных сигналов [1; 4] в космическом пространстве.

Чистый алмаз относится к диэлектрикам, но после легирования примесью он преобразуется в полупроводник, и его свойства находят применения в микро- и нанoeлектронике.

Такие свойства, как высокая теплопроводность и напряженность электрического поля пробоя, делают его одним из перспективных полупроводников для электромагнитных высокочастотных датчиков, способных сохранять физические свойства в области высоких температур.

На рис. 1 представлена зависимость температуры Дебая (T_D) от величины запрещенной зоны для некоторых полупроводников.

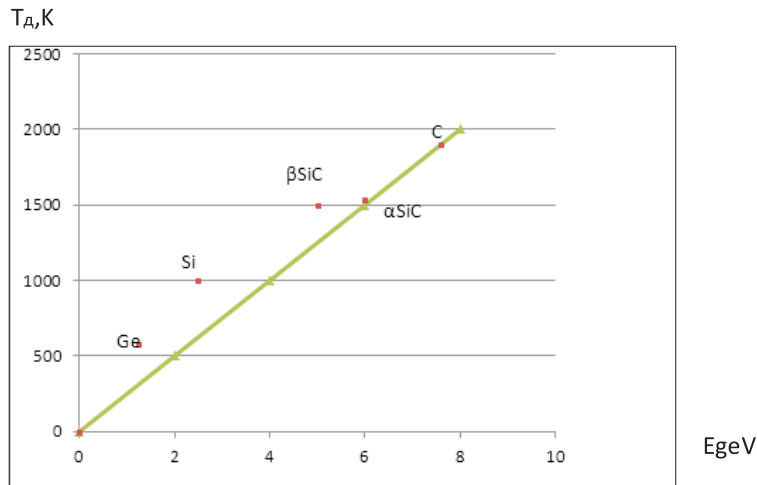


Рис. 1. Зависимость температуры Дебая (T_D , К) от величины запрещенной зоны для некоторых полупроводников (Ge — германий; Si — кремний, α , β , SiC — карбид кремния, C — алмаз)

Температура Дебая (T_D) определяет общую устойчивость элементов внешнему воздействию (температуры, радиации электромагнитного поля).

Результаты исследования по применению карбида кремния в качестве преобразователя СВЧ-излучения в постоянное значение радиоЭДС показали (рис. 2), что такой полупроводник наиболее перспективен в режимах мощных электромагнитных излучений по сравнению с использованными аналогами — кремний (Si), арсенид галлия (GaAs), индий сурьма (InSb) (рис. 1).

Обладая высокой подвижностью носителей заряда, большой шириной запрещенной зоны, термической устойчивостью при температурах до 600 \div 700 °С и

слабым эффектом радиационного воздействия на полезный сигнал, высокотемпературный карбид кремния является наиболее востребованным для развития наноэлектроники. Этот полупроводник по своим параметрам нашел применение для измерения высоких уровней мощности СВЧ-излучения, датчиков контроля в системе управления ядерных реакторов; в авиационной, космической и нефтедобывающей технике. Одной из актуальных проблем использования карбида кремния является разработка датчиков измерения мощности непрерывных и импульсных СВЧ-сигналов. Среди различных методов измерения СВЧ-мощности наиболее эффективны гальваномагнитные свойства в полупроводниках, на базе которых возможно регистрировать не только величину мощности, но и анализировать структуру СВЧ-сигналов [1].

В СВЧ-диапазоне излучения гальваномагнитные свойства в полупроводнике характеризуются радиоэлектрическим (радиоЭДС) или высокочастотным эффектом Холла [5]. Отличительная особенность этого эффекта проявляется безынерционностью реакции на воспринимаемый СВЧ-сигнал, что соответствует требованиям радиосвязи и радиолокации. Результаты исследования показали, что радиоЭДС для карбидокремниевых преобразователей линейно зависит от величины мощности СВЧ-сигнала в диапазоне частот 10 ГГц.

На рис. 2 представлен график зависимости радиоЭДС от величины СВЧ-мощности на частоте 10 ГГц.

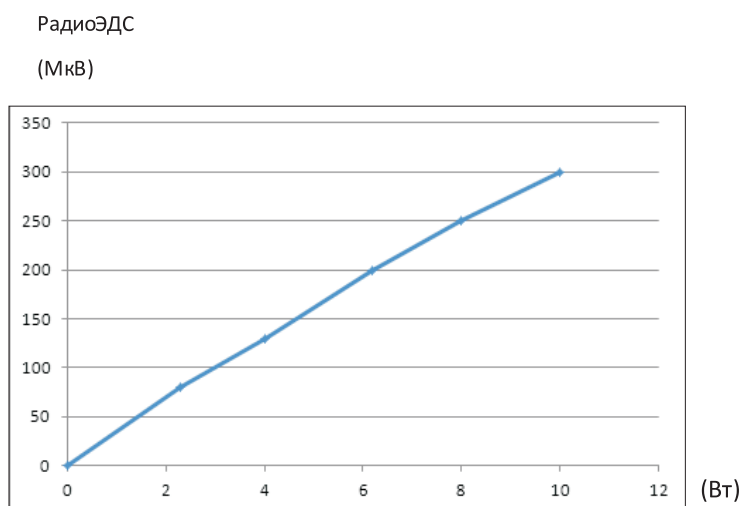


Рис. 2. Зависимость радиоЭДС от воздействия проходящей мощности СВЧ-излучения частотой 10 ГГц на датчик на основе карбидокремниевой гетероструктуры

График зависимости радиоЭДС от величины СВЧ-мощности (рис. 2) определен с помощью волноводной головки 3-х см диапазона длин волн с холловским преобразователем 1 (рис. 3).

Новизна измерительной головки в том, что область контактов к полупроводниковому преобразователю вынесена из зоны действия электромагнитной волны и не требует настройки.

В качестве полупроводникового преобразователя используется карбид кремния [6; 7]. Высокая напряженность электрического поля пробоя карбида кремния и высокая скорость дрейфа тока характеризуют этот преобразователь уникальным

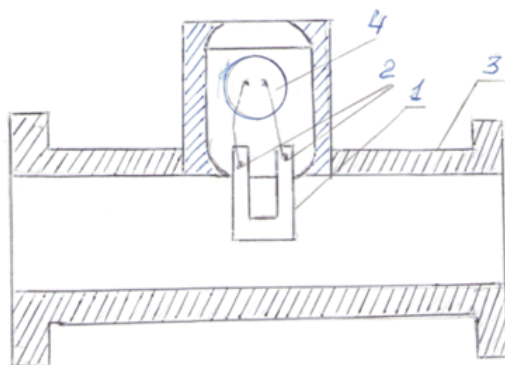


Рис. 3. Измерительная волноводная головка с датчиком Холла (1) для определения величины мощности СВЧ-излучения:

1 — полупроводниковый датчик Холла, 2 — омические контакты, 3 — волноводная головка, 4 — выводы контактов на измерительный прибор

материалом для создания мощных высокочастотных и температуростойких приборов.

Карборунд — 1 карбид кремния состоит из 70,045 % кремния (Si) и 29,955 % углерода (C); температура плавления 2700 °С, ширина запрещенной зоны $\Delta E=1,5$ эВ.

По своим свойствам карбид кремния перспективен для его использования в разработке датчиков измерения мощности непрерывных и импульсных СВЧ-сигналов. Среди известных методов анализа структуры СВЧ-излучений хорошо освоены гальваномагнитные явления в полупроводниках, на базе которых возможны не только регистрация величины мощности излучения, но и анализ его структур.

В СВЧ-диапазоне гальваномагнитные явления представлены в форме радиоэлектрического эффекта (радиоЭДС) или высокочастотного эффекта Холла. Отличительная особенность этого эффекта характеризуется безынерционностью реакции на воспринимаемый сигнал, что соответствует требованиям радиосвязи и радиолокации.

Результаты исследования показали, что радиоЭДС для карбидокремниевых преобразователей линейно зависит от величины мощности СВЧ-сигнала в диапазоне частот 10 ГГц и в интервале температур от 20° до 300 °С. На рис. 2 представлен график зависимости радиоЭДС от СВЧ-мощности на частоте 10 ГГц.

Использование карбида кремния в СВЧ-электронике, наноэлектронике может существенно расширить функциональные возможности его применения. Высокая температура Дебая⁽¹⁾ и собственная теплопроводность способствуют надежной работе приборов на основе карбида кремния в условиях воздействия радиации. Вместе с тем карбидокремниевые электронные приборы могли бы внести определенный вклад в космические реакторные системы, такие как ТОПАЗ-2, который осуществляется совместно с американскими специалистами. Помимо ядерной энергетики, высокотемпературные приборы, способные работать в неблагоприятной обстановке, необходимы для космической и авиационной техники, автотранспорта, нефтяной и газовой техники.

Большая напряженность электрического поля пробоя карбида кремния, высокая скорость дрейфа носителей тока и высокая теплопроводность характеризуют

его уникальным материалом для создания мощных высокочастотных приборов, работающих при высоких температурах. Такие разработки, как SiC-светодиоды, излучающие в коротковолновой области спектра (сине-фиолетовый), применяются в настоящее время в системе отображения оптической информации, в анализе состава газов и жидкости (хроматография и люминесцентный анализ), системах оптического контроля, медицине, в интегрированных оптоэлектронных приборах.

Перечисленные свойства карбида кремния открывают перспективу развития высокотемпературной и радиационно стойкой электроники, оптоэлектроники для коротковолновой и ультрафиолетовой областей спектра частот, мощной СВЧ-электроники. Кроме того, благодаря своим уникальным химико-механическим свойствам он находит применение в качестве подложек для наноэлектроники.

В отличие от хорошо известных полупроводников карбид кремния относится к синтетическим драгоценным камням [3] и может быть использован в ювелирной промышленности. В процессе выращивания кристаллов и выбранных присадок к ним образуются камни различного цвета и оттенка. Синтетические драгоценные камни, имеющие чрезвычайный блеск и твердость, изготавливаются из кристаллов карбида кремния одного политипа с относительно низким содержанием примесей. На сегодняшний день единственным химическим веществом, который считается драгоценным камнем, является алмаз (однокристаллический углерод). Этот материал один из самых известных минералов. Его можно использовать в микроволновой электронике с высокой мощностью для изготовления ультрафиолетовых светодиодов.

Обладая большой шириной запрещенной зоны, алмаз характеризуется самой высокой СВЧ-проводимостью, теплопроводностью; в нем слабо проявляется эффект радиационных нарушений; подвижность электронов и дырок почти неразличима. Однако если разработка приборов на основе карбида кремния получила широкое развитие, то освоение алмазной технологии пока не достигло такого уровня.

Литература

- [1] А. с. № 303910 Ненастраиваемая измерительная головка с датчиком Холла / А.Н. Комов. Госрегистрация изобретений СССР. 28.02.1987.
- [2] А. с. № 1062617 Датчик СВЧ-мощности / А.М. Белогорцев, А.Н. Комов, В.Н. Трещев. Госрегистрация изобретений СССР.
- [3] Патент РФ. RU2156330 Драгоценные камни из карбида кремния / Ч.Э. Хонтер. 27.08.1996.
- [4] А. с. № 951168 Устройство для измерения мощности сверхвысоких частот / А.Н. Комов, В.А. Клычков, Л.М. Смирнова. Госрегистрация изобретений СССР. 02.04.1980.
- [5] Патент РФ № 58724 Волноводная измерительная регулируемая головка с датчиком Холла / А.Н. Комов, А.А. Колесникова, В.Ч. Чепурнов, А.В. Щербак. Госрегистрация изобретений РФ. 27.11.2006.
- [6] А. с. № 791113 Способ получения эпитаксиальных пленок карбида кремния / А.Н. Комов, В.И. Чепурнов, М.В. Шмалев, В.Г. Блатов, Б.И. Смыслов, А.А. Соколова. Госрегистрация изобретений СССР 10.01.1979.
- [7] А. с. № 1566809 Способ выращивания монокристаллического карбида кремния / А.Н. Комов, В.И. Чепурнов, В.Т. Пряхин, В.И. Левин, В.Ф. Цветков. Госрегистрация изобретений СССР. 22.01.1990.

- [8] Комов А.Н., Яровой Г.П. СВЧ-полупроводниковая электроника. М.: Радио и связь, 2007. 150 с.
- [9] Силаев М.А., Комов А.Н. Измерительные полупроводниковые СВЧ-преобразователи. М.: Радио и связь, 1984. 149 с.
- [10] Комов А.Н., Трещев В.М. Гальваномагнитные СВЧ-преобразователи. М.: Радио и связь, 2000. 264 с.

References

- [1] A. s. № 303910. Inflexible detecting head with Hall sensor / A.N. Komov. State registration of inventions of USSR. 28.02.1987.
- [2] A. s. № 1062617 Sensor of super-high frequencies energy / A.M. Belogortsev, A.N. Komov, V.N. Treshchev. State registration of inventions of USSR.
- [3] Patent RF. RU2156330. Gems from silicone carbid / Ch.E. Khonter. 27.08.1996.
- [4] A. s. № 951168 Apparatus for measurement of power of super-high frequencies / A.N. Komov, V.A. Klychkov, L.M. Smirnova. State registration of inventions of USSR. 02.04.1980.
- [5] Patent RF. № 58724. Wave guide measuring regularable head with Hall sensor / A.N. Komov, A.A. Kolesnikova, V.Ch. Chepurnov, A.V. Shcherbak. State registration of inventions RF. 27.11.2006.
- [6] A. s. № 791113. Method for the production of epitaxially grown films of silicone carbid / A.N. Komov, V.I. Chepurnov, M.V. Shmalev, V.G. Blatov, B.I. Smyslov, A.A. Sokolova. State registration of inventions of USSR. 10.01.1979.
- [7] A. s. № 1566809. Growth technique of monocrystal silicone carbid / A.N. Komov, V.I. Chepurnov, V.T. Pryahin, V.I. Levin, V.F. Tsvetkov. State registration of inventions of USSR. 22.01.1990.
- [8] Komov A.N., Yarovoy G.P. Super-high frequency semiconductor electronics. M.: Radio i svyaz', 2007. 150 p.
- [9] Silaev M.A., Komov A.N. Measuring semiconductor super-high frequency converters. M.: Radio i svyaz', 1984. 149 p.
- [10] Komov A.N., Treshchev V.M. Galvanomagnetic super-high frequency converters. M.: Radio i svyaz', 2000. 264 p.

Поступила в редакцию 4/XII/2013;
в окончательном варианте — 4/XII/2013.

ADVANCED SEMICONDUCTOR MATERIALS FOR THE DEVELOPMENT OF SUPER-HIGH FREQUENCIES AND NANOELECTRONICS

© 2014 A.N. Komov²

The results of application of semi-conductor converters on the basis of silicon carbide as a sensitive super-high frequency signals recorder. It was also noted that this material is prospective in the development of such areas as medicine, aerospace equipment, high-speed communication lines. The necessity of silicon carbide is increasing for its application in nanoelectronics.

Key words: silicon carbide, electromagnetic emission, wireless EMF, Debye temperature, diamond.

Paper received 4/*XII*/2013.

Paper accepted 4/*XII*/2013.

²Komov Alexander Nikolaevich (Komov@mail.ru), the Dept. of Radiophysics, Semiconductor, Micro- and Nanoelectronics, Samara State University, Samara, 443011, Russian Federation.