

ТЕРМОЭДС В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ КАРБИДА КРЕМНИЯ НА КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКЕ В ОБЛАСТИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

© 2004 А.Н. Комов, В.И. Чепурнов,¹ В.М. Трещев, Г.П. Яровой²

В данной работе проводится анализ одного из паразитных эффектов, влияющего на выходной сигнал полупроводникового преобразователя Холла, — явление термоЭДС. Преобразователь Холла представляет собой тонкопленочный элемент из карбида кремния на подложке. Проводится эксперимент по изучению характеристик датчика Холла на основе гетероструктуры SiC/Si в поле электромагнитной волны частотой 40 ГГц. Приводятся результат измерений и их анализ. Показано, что термоЭДС не влияет на результат измерений, ее величина не превышает ошибки измерений и составляет 10%. Разработанная конструкция датчика СВЧ-мощности, состоящего из преобразователя Холла и волноводной головки, позволяет исключить влияние выпрямления на контактах "металл-полупроводник". Полученные результаты могут быть полезны при изучении свойств гетероструктур SiC/Si в области сверхвысоких частот, а также для разработчиков СВЧ измерительной техники.

1. Термоэлектрические явления в полупроводниках на сверхвысоких частотах

При измерении проходящей мощности СВЧ-методом эффекта Холла в полупроводниках наблюдается влияние сопутствующих эффектов, которые приводят к возникновению дополнительных ЭДС в датчике Холла. Накладываясь на полезный холловский сигнал, паразитные явления приводят к искажению напряжения, измеряемого на контактах датчика Холла, и, тем самым, вносят погрешности при определении мощности в исследуемом СВЧ-тракте [1].

¹Комов Александр Николаевич (Komov@ssu.samara.ru), Чепурнов Виктор Иванович, кафедра электроники твердого тела Самарского государственного университета, 443011, Россия, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

²Трещев Владимир Михайлович, Яровой Геннадий Петрович, кафедра радиофизики и компьютерного моделирования радиосистем Самарского государственного университета, 443011, Россия, г. Самара, ул. Акад. Павлова, 1.

Результирующее напряжение на контактах датчика Холла, установленного в волноводном тракте (рис. 1,б), определяется алгебраической суммой различных ЭДС: $V_{\Sigma} = V_x + \Sigma V_I$, где V_x — напряжение Холла, V_I — напряжение, обусловленное сопутствующим эффектом, и получило название радио-электрическая ЭДС [1].

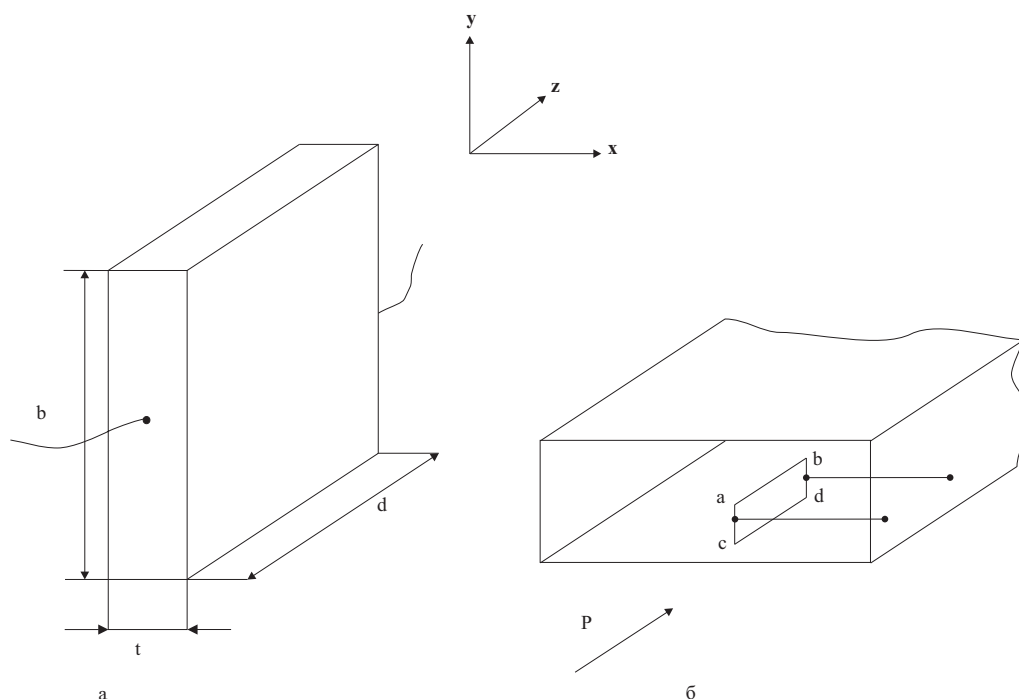


Рис. 1. Напряжение, измеряемое на контактах датчика Холла: а — СВЧ-преобразователь Холла, б — расположение преобразователя в волноводе

Одним из паразитных эффектов, существенно влияющим на выходной сигнал с датчика Холла, является термоЭДС, обусловленное градиентом температуры между невыпрямляющими контактами преобразователя в поле СВЧ и неравномерным разогревом его объема [2].

Величина термоЭДС в ряде случаев сравнима, а иногда может и превышать величину ЭДС Холла, так как коэффициенты термоЭДС для полупроводников достаточно велики (от 0,1 до 1 мВ/град). Следует отметить, что в металлах, применяемых в качестве контактов к преобразователям Холла, значение коэффициента термоЭДС составляет несколько мкВ/град, поэтому в большинстве случаев можно пренебречь термоЭДС в металле по сравнению с термоЭДС в полупроводнике [2].

Экспериментально выделить термоЭДС в выходном сигнале сложно, так как она имеет такой же знак, что и ЭДС Холла, термоЭДС не зависит от магнитной составляющей электромагнитного поля. Разность температур

между холловскими электродами датчика, находящегося в электромагнитном поле, появляется по следующим причинам:

- из-за неодинаковых токовых контактов;
- из-за неравномерного выделения джоулева тепла в пластине преобразователя вследствие неравномерного поглощения СВЧ-мощности.

Можно оценить величину термоЭДС, возникающую в результате неравномерного разогрева пластины, если предположить, что пластина преобразователя изотропна и однородна, тонкая и расположена в центральной плоскости волновода.

Пусть преобразователь представляет собой прямоугольную пластину из полупроводникового материала с двумя холловскими выводами. Его расположение в волноводном тракте показано на рис. 1,б.

В режиме работы СВЧ-генератора на согласованную нагрузку грань a – c преобразователя, поглощая падающую на нее электромагнитную волну, нагревается больше, чем противоположная грань b – d .

Это приводит к возникновению градиента температуры по ширине пластины, а, следовательно, к появлению термоЭДС, определяемой выражением:

$$V_T = -\alpha_T \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (1.1)$$

где α_T — коэффициент термоЭДС полупроводника.

Как видно из этого выражения, расчет термоЭДС сводится к определению градиента температуры по длине преобразователя.

При существовании в волноводе стоячей волны величина термоЭДС может существенно возрасть, а в случае соизмеримости длины волны с линейными размерами преобразователя достигает максимального значения.

РадиоЭДС определяется из выражения [3]:

$$V_x = \frac{4\pi R_x \sigma}{c\Gamma} W_0 (1 - e^{-\Gamma L}), \quad (1.2)$$

где R_x — постоянная Холла, σ — проводимость полупроводника,

$$\Gamma = 2\text{Im} \left(\frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon - \frac{4i\pi\sigma}{\omega}} \right),$$

L — ширина образца по направлению распространения электромагнитной волны, $W_0 = -\frac{c}{4\pi} \left[\overline{HE} \right]_{z=0}$ — плотность потока энергии.

Значение V_T определяется соотношением [2]:

$$V_T = -\frac{\alpha_T}{\kappa} \frac{W_0}{\Gamma} \frac{h_1(1 - \Gamma L - e^{-\Gamma L}) + h_2(1 - e^{-\Gamma L}(1 - \Gamma L))}{h_1 + h_2 + L}. \quad (1.3)$$

Здесь $h_1 = \frac{\kappa}{4ST^3}$, где S — постоянная Стефана–Больцмана, κ — коэффициент теплопроводности, α_T — коэффициент термоЭДС.

Из соотношения (1.2) следует, что V_x линейно зависит от плотности потока энергии W_0 , а из соотношения (1.3) величина V_T в значительной степени зависит от теплоотвода с передней h_1 и задней грани образца h_2 . При

$h_1 = h_2 = 0$, $V_T = 0$, т.е. термоЭДС не вносит вклада в радиоэлектрический эффект. Однако термоЭДС может превышать ЭДС Холла для образцов с $L \gg (l/\delta_0)^2$, где l — длина свободного пробега носителей заряда, $\delta_0^2 = \frac{c^2}{\omega_0^2}$, $\delta = \frac{1}{\Gamma}$. В этом случае

$$V_T = \frac{\alpha}{\kappa} W_0 \frac{\Gamma L + e^{-\Gamma L} - 1}{T}. \quad (1.4)$$

Из анализа соотношения (1.4) следует, что при больших значениях L термоЭДС может превышать радиоЭДС. Выразим термоЭДС соотношением

$$V_T = \frac{\alpha_T}{h} P_0 |\Gamma| f(2\beta z). \quad (1.5)$$

Здесь β — фазовая постоянная,

$$P_H = P_0(1 + |\Gamma|^2 + 2|\Gamma|\cos(2\beta z)), \quad (1.6)$$

где P_H — мощность, прошедшая в нагрузку, P_0 — мощность излучения, подающая на нагрузку, z — координата по направлению распространения СВЧ-волны.

Проинтегрируем (1.5) по координате z , для точки максимума $\Delta T = 1$; $2\beta z = \pi/2 + n$, где $n=1, 2, \dots$. ЭДС Холла V_x будет определяться мощностью, прошедшей в нагрузку $P_H = P(1 - |\Gamma_H|^2)$.

В зависимости от $|\Gamma_H|$ отношение $\frac{V_T}{V_x} = \frac{|\Gamma_H|}{1 - |\Gamma_H|^2}$ позволяет определить влияние термоЭДС на величину ЭДС Холла. Так для $KCBH \leq 1.10$, т.е. при $|\Gamma_H| \leq 0.04$ $\frac{V_T}{V_x}$ составляет 10%.

Экспериментальные результаты измерения термоЭДС для стоячих волн показали согласование с расчетными данными для образцов прямоугольной формы (рис 2, 3).

Для оценки влияния термоЭДС на ЭДС Холла в слоистых гетероструктурах SiC/Si проведено экспериментальное исследование в диапазоне коротких длин волн $\lambda = 8$ мм.

ЭДС Холла и термоЭДС по своим физическим свойствам существенно отличаются друг от друга, а именно:

1. *Временем установления.*

Величина напряжения Холла в отличие от термоЭДС практически безынерционна при переменном сигнале СВЧ мощности.

2. *Фазовой зависимостью.*

Величина холловского напряжения зависит от фазового соотношения между током, текущим через полупроводник, и магнитным полем. ТермоЭДС зависит только от электрической составляющей электромагнитного поля.

Эти различия свойств позволяют найти способ разделения ЭДС Холла и термоЭДС.

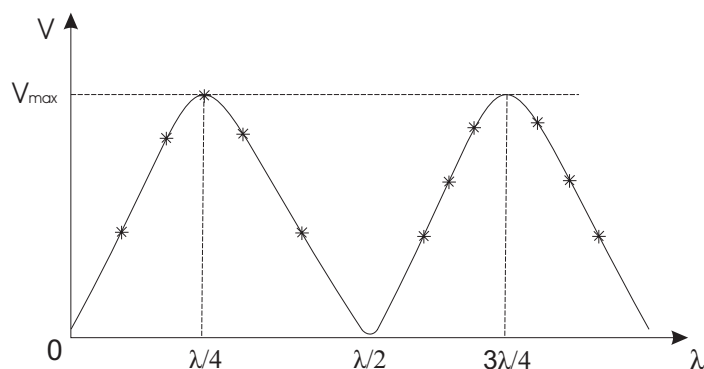


Рис. 2. Изменение термоЭДС в датчике Холла с прямоугольной формой преобразователя от его положения в режиме стоячей СВЧ-волны: 1 — сплошная кривая — теория, 2 — * — эксперимент

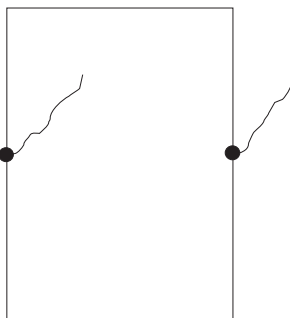


Рис. 3. СВЧ-преобразователь Холла прямоугольной формы

Предположим, что $V_{\text{вых}} = V_x + V_T$. Если термоЭДС обусловлена рассогласованием передающей линии, то для идеально согласованной линии КСВН равен единице и V_T равна нулю.

Устанавливая в линии режим стоячей волны и меняя положение датчика в ней таким образом, чтобы $V_{\text{вых}}$ менялось от максимального до минимального значения, можно определить влияние рассогласования, вносимого в тракт самим датчиком.

2. Экспериментальные характеристики датчика на основе гетероструктуры SiC/Si в диапазоне длин волн 8 мм

На сверхвысоких частотах основным контролируемым параметром является мощность. Измерение мощности на постоянном и переменном токе относительно низкой частоты может быть заменено измерением действующих значений электрического напряжения и тока в нагрузке. В СВЧ-диа-

пазоне, вследствие соизмеримости размеров входных цепей измерительных устройств с длиной волн измеряемого сигнала, измерение напряжения и тока теряет смысл. В связи с этим на частотах свыше 1000 МГц мощность является единственным параметром, однозначно характеризующим интенсивность электромагнитных волн. Измерение мощности и зависимость выходного сигнала с датчика Холла выполнялись на установке, блок-схема которой представлена на рис. 4.

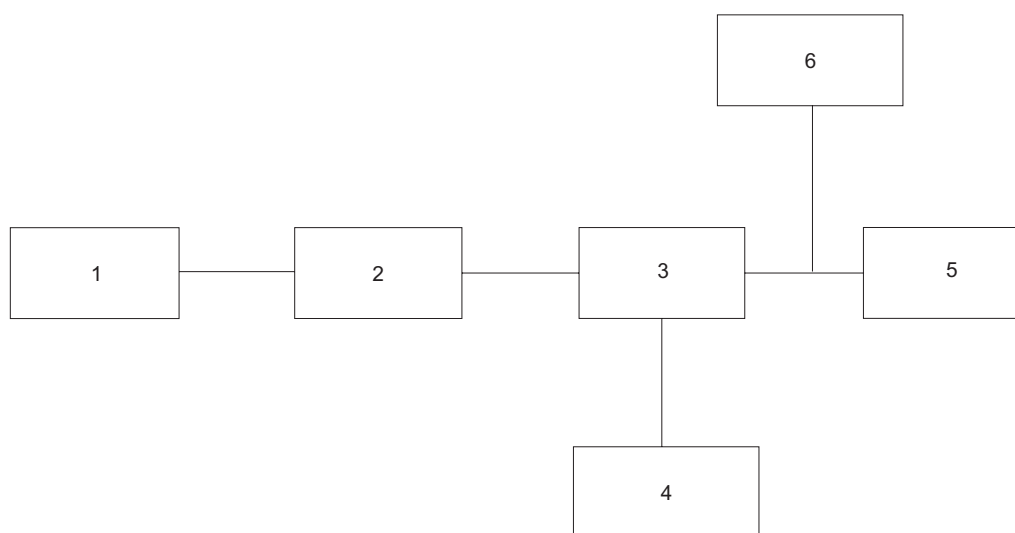


Рис. 4. Блок-схема проведения измерений: 1 — магнетронный генератор, 2 — аттенуатор, 3 — датчик Холла, 4 — милливольтметр В2-11, 5 — согласованная нагрузка, 6 — термисторный мост М4-3

По этой схеме были произведены исследования преобразователя на структуре карбида кремния, выращенного на кремниевой подложке. Схематическое изображение преобразователя представлено на рис. 5.

3. Изготовление датчика Холла

На кремниевой пластине р-типа проводимости и толщиной 0,3 мм в установке гетероэпистаксиального выращивания создавалась пленка карбида кремния р-типа толщиной 10 мкм. Затем на слой карбида кремния в установке ВУП-4 напылялись алюминиевые контакты. После чего пластина нарезалась на прямоугольные образцы п-образной формы с размерами, указанными на рис. 5. Далее к алюминиевым контактам приваривались золотые выводы. Свойства контактов проверялись на характериографе на вольт-амперной характеристике, которая была линейной в рабочем интервале. Последним этапом подготовки к проведению эксперимента было закрепление преобразователя в специальном держателе — волноводной головке (рис. 6) для размещения его в волноводном тракте. Конструкция вол-

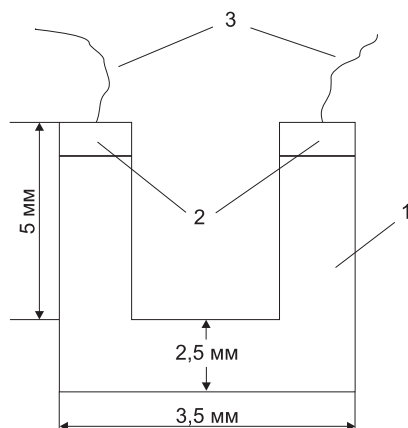


Рис. 5. Схематическое изображение преобразователя Холла на основе структуры SiC/Si: 1 — структура SiC/Si, 2 — алюминиевые контакты, 3 — золотые выводы

новодной головки и форма преобразователя позволяла исключить влияние СВЧ поля на контакты преобразователя, т.е. они были вынесены из волновода. Рабочая область преобразователя, размещенной в волноводе, была размером 2.5×3.5 мм.

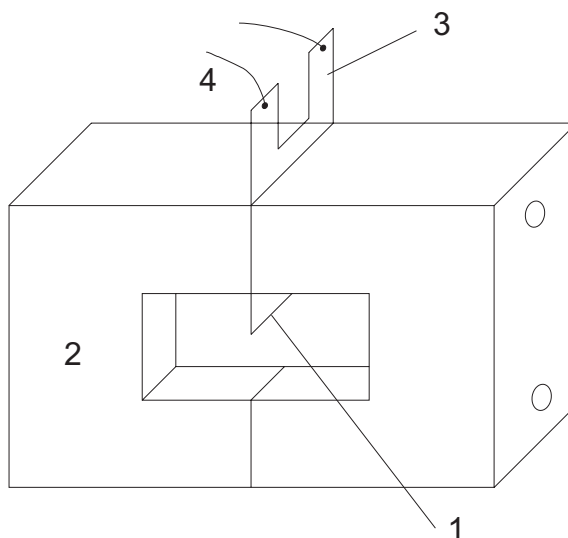


Рис. 6. Схематическое изображение датчика, закрепленного в волноводной головке: 1 — преобразователь SiC/Si, 2 — корпус волноводной головки, 3 — контактные выводы, 4 — выходные проводники к измерительному прибору

С ростом СВЧ-мощности выходной сигнал с преобразователя линейно возрастает. Максимальное значение СВЧ-излучения составляло 1 Вт непрерывного сигнала (кривая I рис. 7). Изменение направления падающего сиг-

нала на 180° не нарушает линейной зависимости. Однако величина этого сигнала уменьшалась (кривая II рис. 7).

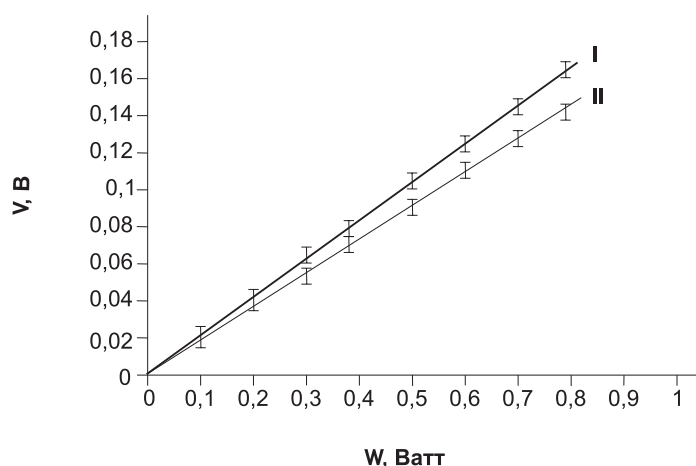


Рис. 7. Вольт-ваттная характеристика СВЧ-датчика: I — зависимость для первоначального положения датчика, II — зависимость после того, как датчик был повернут на 180° относительно направления падающего излучения

Различие выходного сигнала при двух положениях датчика относительно направления падающей волны объясняется разными значениями термоЭДС и не превышало 10%. Измерялся коэффициент стоячей волны, и было получено значение, равное 2.

Заключение

Таким образом, в работе был выполнен анализ явления термоЭДС и проведено экспериментальное исследование характеристик структуры SiC/Si на сверхвысоких частотах. Полученные характеристики говорят о перспективности дальнейшего развития технологий SiC/Si и его преимуществах по сравнению с другими полупроводниковыми материалами, так как высокая термостойкость карбида кремния позволяет измерять большие уровни СВЧ-сигнала. В частности, проведенные опыты показывают, что вольт-ваттная характеристика имеет линейную зависимость в исследуемом диапазоне. Такой прибор может быть использован для измерения мощности 8 мм диапазона длин волн. Влияние паразитных эффектов, таких как термоЭДС, можно снизить до пренебрежимо малых значений с помощью технологии изготовления преобразователей, их форма и конструкция держателя позволяют вынести контакт "металл-полупроводник" из зоны действия СВЧ-поля.

Литература

- [1] Гуляев Ю.В. О возникновении постоянной ЭДС при распространении электромагнитной волны в проводящей среде // Радиотехника и электроника. 1968. Т. 4. С. 688–694.
- [2] Комов А.Н., Трещев В.М., Яровой Г.П. Гальваномагнитные СВЧ-преобразователи. М.: Радио и связь, 2000. 264 с.
- [3] Комов А.Н. Полупроводниковая СВЧ-электроника. Куйбышев, 1990. 230 с.
- [4] Коганов М.И., Шапиро А.А. О влиянии термоэлектрических сил на радиоэлектрический эффект в полупроводниках // ФТТ. Т. 12. Вып. 10. С. 3019–3021.

Поступила в редакцию 18/XI/2004;
в окончательном варианте — 18/XI/2004.

THERMOPOWER ON HETEROSTRUCTURE SILICON CARBIDE ON SILICON SUBSTRATE IN MICROWAVE REGION

© 2004 A.N. Komov, V.I. Tchepurnov³, V.M. Treschov, G.P. Yarovoy⁴

In this paper the analysis of a stray effect on Hall-sensor's efficiency signal sensuality is given,—it is thermopower. The Hall-effect sensor is a silicon carbide thin-film element on silicon substrate. The curves of SiC-sensors at 40GHz wave are studied and results of measurements and their analysis are discussed. It is shown, that thermopower does not affect outcome value of the Hall voltage; error is lower then scaling measurements. The microwave power sensor consisted of the Hall-sensor and waveguide package excludes rectifying junction of metal-semiconductors. The results may be used for study of SiC/Si heterostructure properties at microwave range.

Paper received 18/XI/2004.

Paper accepted 18/XI/2004.

³Komov Aleksander Nikolaevich (Komov@ssu.samara.ru), Tchepurnov Viktor Ivanovich, Dept. of Solid State Electronics, Samara State University, Samara, 443011, Russia.

⁴Treschov Vladimir Mikchailovich, Yarovoy Gennadiy Petrovich, Dept. of Radiophysics and Computer Modelling of Radiosystems, Samara State University, Samara, 443011, Russia.