

УДК 62-762.001.5

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМОЭДС НА РАБОТУ ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СВЧ МОЩНОСТИ

© 2011 Л.В.Курганская<sup>1</sup>, А.В. Щербак<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учреждение Российской академии наук  
Институт проблем управления сложными системами РАН, г. Самара

<sup>2</sup>Самарский государственный университет

Поступила в редакцию 06.09.2011

Рассмотрено влияние термоэлектрической составляющей радиоэлектрического эффекта в полупроводниках на коэффициент преобразования уровня СВЧ мощности и стабильность работы гальваномагнитных преобразователей СВЧ мощности. Показана возможность снижения влияния термоэдс на выходной сигнал преобразователя СВЧ мощности за счет оптимизации его конструкции.

Ключевые слова: термоэдс, радиоэлектрический эффект, преобразователи СВЧ мощности.

Радиоэлектрический эффект в полупроводниках, заключающийся в возникновении постоянной электродвижущей силы или постоянного тока в полупроводниковой пластине под действием электромагнитной волны, лежит в основе одного из способов прямого измерения уровня проходящей СВЧ мощности [1]. К достоинствам измерителей мощности на основе радиоэлектрического эффекта относятся линейная зависимость выходного сигнала от уровня СВЧ мощности, весьма малая инерционность процесса измерения, простота конструкции преобразующего элемента. Широкое распространение подобных измерителей СВЧ мощности сдерживается низкой стабильностью коэффициента преобразования уровня СВЧ мощности в сигнал постоянного тока. К нестабильности коэффициента преобразования в основном приводят такие факторы как изменение концентрации и подвижности носителей заряда в полупроводниках при изменении температуры, а также неоднородный разогрев преобразователя в поле СВЧ волны, приводящий к появлению термоэдс.

Возникновение радиоэлектрического эффекта в полупроводниковой пластине  $abcd a'b'c'd'$  схематично показано на рис. 1. Электромагнитная волна падает на грань  $abcd$  и распространяется в направлении вектора Умова-Пойтинга  $\mathbf{S}$ . Между гранями  $abcd$  и  $a'b'c'd'$  возникает постоянная ЭДС, знак которой зависит от типа носителей заряда полупроводника.

Величина радиоэдс в общем случае представляет собой сумму электродвижущих сил различной природы

Курганская Любовь Викторовна, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник.

E-mail: limbo83@mail.ru.

Щербак Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

E-mail: anshch@yandex.ru.

$$V = V_H + V_T + \sum V_i. \quad (1)$$

Первое слагаемое здесь  $V_H$  – ЭДС Холла, значение которой прямо пропорционально уровню СВЧ мощности. ЭДС Холла и является полезным сигналом. Второе слагаемое  $V_T$  – ЭДС неоднородного разогрева. Это слагаемое существенно зависит от внешних условий. Остальные слагаемые в (1) соответствуют различным сопутствующим эффектам (эффект Эттингсгаузена, выпрямление на контактах и др.). Величины электродвижущих сил этих эффектов существенно ниже первых двух и их суммарный вклад в радиоэлектрический эффект пренебрежимо мал.

ЭДС Холла и термоэдс имеют различную физическую природу и существенно отличаются друг от друга по своим свойствам [2], [3]. Основные их отличия заключаются в следующем:

1) ЭДС Холла обусловлена наличием электромагнитного поля в полупроводнике. Время установления порядка времени максвелловской

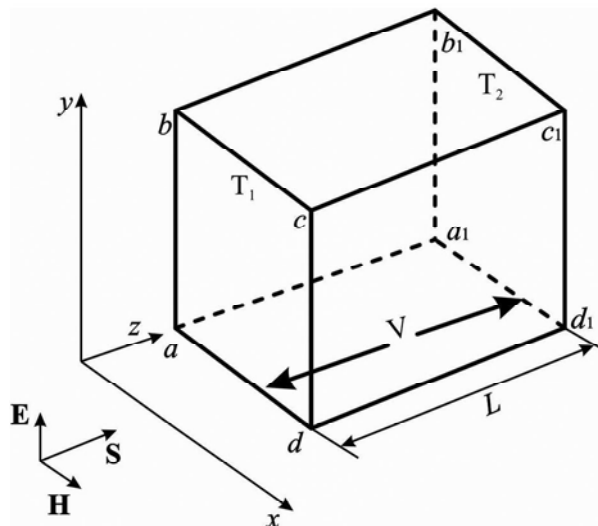


Рис. 1. Радиоэлектрический эффект

релаксации ( $10^{-12}$  -  $10^{-13}$  с). Термоэдс, напротив, связана с весьма инерционными процессами выделения и распространения тепла в полупроводниковой пластине. Время установления и исчезновения термоэдс может достигать нескольких десятков секунд.

2) Величина ЭДС Холла зависит от фазового соотношения между током, текущем через полупроводник, и падающим магнитным потоком. Термоэдс такой зависимости не имеет.

3) ЭДС Холла и термоэдс по-разному зависят от компонент электромагнитного поля. ЭДС Холла зависит от векторного произведения электрического и магнитного полей, тогда как термоэдс, возникающая из-за градиента температуры, обусловленного электрическим полем в линии передачи, зависит только от электрического поля волны, и не зависит от магнитного поля.

В режиме работы генератора на согласованную нагрузку, грань  $abcd$  преобразователя (рис. 1), воспринимающая падающую электромагнитную волну, поглощает энергию и нагревается больше, чем противоположная грань  $a'b'c'd'$ . Это приводит к возникновению градиента температуры по ширине пластины, а, следовательно, к появлению термоэдс, определяемой выражением:

$$V_T = \int_{T_1}^{T_2} \alpha_T dT,$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент термоэдс полупроводника,  $T_1$  и  $T_2$  температуры соответствующих граней (рис. 1). Если толщина  $ab$  полупроводниковой пластины мала, то можно пренебречь процессом распространения тепла между гранями  $abcd$  и  $a'b'c'd'$ , и теплообменом через торцевые площадки, так как их площадь мала по сравнению с площадью боковых поверхностей пластины. В этом случае при выполнении критерия малости поля в [3] была получена формула для расчета разности температур на противоположных гранях преобразователя:

$$\Delta T = \frac{\sigma E^2 \alpha}{\kappa \sqrt{h} (4\alpha^2 - h)} \left[ \frac{(e^{-2\alpha d} - e^{-d\sqrt{h}})(1 - e^{d\sqrt{h}})}{1 + e^{d\sqrt{h}}} + \frac{\sqrt{h}}{2\alpha} (1 - e^{-2\alpha d}) \right],$$

где  $h = \frac{2H_1}{\kappa T}$ ,  $H_1$  – коэффициент теплообмена

боковой поверхности пластины;  $\kappa$  – теплопроводность полупроводника;  $\sigma$  – удельная электропроводность полупроводника;  $d$  – расстояние между гранями  $abcd$  и  $a'b'c'd'$ ;  $\alpha$  – коэффи-

циент поглощения полупроводника;  $E$  – амплитуда электрической составляющей волны типа  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе с воздушным заполнением;  $P$  – проходящая мощность.

Исследования радиоэлектрического эффекта на образцах, выполненных в форме прямоугольной пластины с контактами на боковых гранях, а также расчеты термоэдс по формулам (1.2) и (1.3) для ряда полупроводниковых материалов, свидетельствуют о том, что величина термоэдс во всех случаях составляет более 50% от величины ЭДС Холла. Таким образом, преобразователи в форме полупроводниковой пластины с контактами на боковых гранях не обеспечивают приемлемой точности измерений уровня СВЧ мощности.

В [4] предложен преобразователь СВЧ мощности П-образной формы, контакты которого находятся вне волновода, что позволяет полностью устранить термоэдс, возникающую на контактах металл-полупроводник, однако, термоэдс, обусловленная градиентом температуры в объеме преобразователя остается.

Рассмотрим распределение температуры в преобразователе П-образной формы (рис. 2а) и выделим основные источники термоэдс:  $V_{T10}$  – между контактом с температурой  $T_{C1}$  и левой гранью преобразователя,  $V_{T20}$  – между контактом с температурой  $T_{C2}$  и правой гранью,  $V_{T21}$  – между противоположными гранями преобразователя. Общая термоэдс в данном случае выражается формулой:

$$V_T = V_{T10} + V_{T21} + V_{T20}.$$

Выражая соответствующие термоэдс по формуле (1.2) и учитывая их направления получаем:

$$V_T = \alpha_T (T_1 - T_{C1}) + \alpha_T (T_2 - T_1) - \alpha_T (T_2 - T_{C2}) = \alpha_T (T_{C2} - T_{C1}).$$

Из (1.5) видно, что уменьшая разность температур (т.е. обеспечивая хороший тепловой контакт) между контактами преобразователя можно практически устранить термоэдс, обусловленную градиентом температуры в объеме преобразователя.

Для реализации рассмотренного принципа необходимо максимально приблизить друг к другу контактные площадки (рис. 2б), а также использовать подложки из материалов, имеющих высокую теплопроводность.

В данной работе для снижения термоэдс предлагается при разработке полупроводниковых гальваномангнитных преобразователей СВЧ мощности использовать полупроводниковые пленки, нанесенные на изолирующую подложку с высокой теплопроводностью (карбид кремния, алмаз). Известно, что для увеличения ЭДС Холла в качестве рабочего слоя желательно использовать полупроводники с высокой подвижностью носителей заряда (InSb, InP) [5]. Однако, эти полупро-

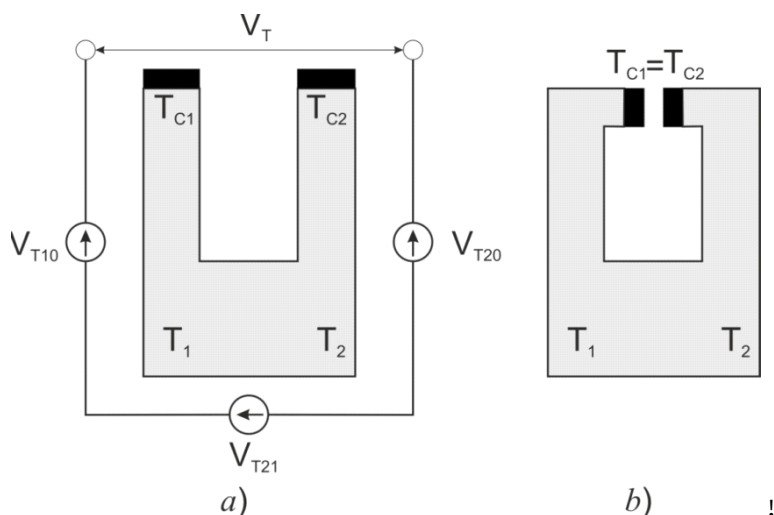


Рис. 2. а – Источники термоэдс в типичном измерительном преобразователе СВЧ мощности; б – преобразователь специальной формы

водники, имеют малую ширину запрещенной зоны, что накладывает жесткие ограничения на температурный диапазон работы и динамический диапазон таких преобразователей.

Для расширения диапазона рабочих температур и измеряемых мощностей авторами предлагается в качестве рабочих слоев преобразователей использовать широкозонные полупроводники, обладающие высокой стабильностью свойств при повышенных температурах и высоких уровнях СВЧ мощности. При высоких уровнях СВЧ мощности допустимо снижение чувствительности преобразователя.

Для исследования эффективности снижения влияния термоэдс на выходной сигнал преобразователя СВЧ мощности путем выравнивания температуры контактов были изготовлены образцы преобразователей СВЧ мощности двух типов (рис. 3):

- 1) рабочий слой – карбид кремния, подложка – монокристаллический кремний;
- 2) рабочий слой – карбид кремния, подложка – поликор.

Образцы первого типа были изготовлены на основе структур карбид кремния на кремнии, полученных методом эндотаксии углерода в матрицу кремния. Образцы второго типа были из-

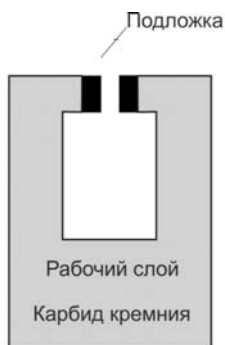


Рис. 3. Образцы преобразователя СВЧ мощности

готовлены методом магнетронного распыления карбида кремния на поликоровую подложку.

Термоэдс образцов первого типа, измеренная методом стоячей волны [6], составляла менее 1% от ЭДС Холла. Термоэдс образцов второго типа, измеренная тем же методом, – менее 5% от ЭДС Холла.

При повышении СВЧ мощности в образцах первого типа наблюдалось снижение коэффициента преобразования за счет шунтирования преобразователя сопротивлением подложки. Для образцов второго вида подобного снижения коэффициента преобразования не было (рис. 4).

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что применение широкозонных полупроводников, в частности карбида кремния, как в качестве подложек, так и в качестве рабочих слоев измерительных преобразователей СВЧ мощности, позволяют существенно

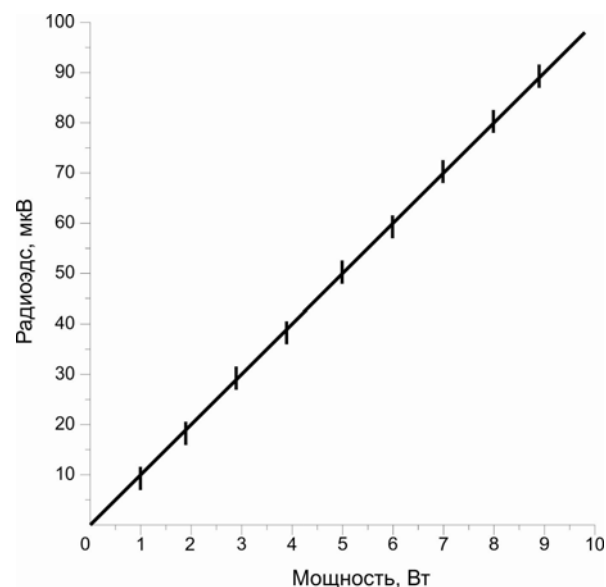


Рис. 4. Зависимость радиоэдс от СВЧ мощности

снизить влияние термоэдс на выходной сигнал, что, в свою очередь, позволит расширить динамический диапазон и увеличить стабильность работы подобных преобразователей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Билько М.И., Томашевский А.К., Шаров П.П.* Измерение мощности на СВЧ. М.: Советское радио. 1976. С. 165.
2. *Гуляев Ю.В.* О возникновении постоянной ЭДС при распространении электромагнитной волны в проводящей среде // Радиотехника и электроника. 1968. Т. 13. №4. С.688-694.
3. *Каганов М.И., Шапиро А.А.* О влиянии термоэлектрических сил на радиоэлектрический эффект в полупроводниках // ФТТ.Т.12.№10-1991. С.3019-3021.
4. *Силаев М.А., Комов А.Н.* Измерительные полупроводниковые СВЧ преобразователи. М.: Радио и связь, 1984. 152 с.
5. *Хилсум К., Роуз-Инс А.* Полупроводники типа АПВ. М.: Иностран. Лит-ра, 1989. С. 323.
6. *Щербак А.В.* Радиоэлектрический эффект в гетероструктурах карбид кремния на кремнии: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.10. Самара, 2005. 110 с.

## THERMOELECTRIC ALIAS IN HALL EFFECT MICROWAVE POWER METER

© 2011 L.V. Kurganskaya<sup>1</sup>, A.V. Shcherbak<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute for the Control of Complex Systems of RAS, Samara

<sup>2</sup> Samara State University

The influence of thermoelectric effect in semiconductors on microwave Hall Effect power meter signal was considered. Thermoelectric alias in Hall Effect power meter may be reduced by optimization of power meter design.

Key words: Thermoelectricity, microwave Hall effect, microwave power meter.

*Lubov Kurganskaya, Candidate of Physics and Mathematics, Research Fellow. E-mail: limbo83@mail.ru.*

*Andrey Shcherbak, Candidate of Physics and Mathematics, Chief Research Fellow. E-mail: anshch@yandex.ru.*