

Л. В. Курганская, И. В. Курганский, А. В. Щербак
(Самара, ИПУСС РАН, СамГУ, СГАУ). **Применение в аэрокосмическом приборостроении широкозонных полупроводников для создания измерителей СВЧ-мощности на основе радиоэлектрического эффекта.**

Область сверхвысоких частот, охватывающая диапазоны от дециметровых до субмиллиметровых длин волн (10^{11} – 10^{12} Гц), широко используется в аэрокосмическом приборостроении, а именно, в бортовых системах космических аппаратов в негерметичном исполнении, в радиолокационной аппаратуре и аппаратуре навигации и связи, а также в системах контроля энергетических установок и систем космических аппаратов.

В связи с этим требуется непрерывное совершенствование радиоизмерительных средств, одним из которых являются измерители СВЧ-мощности. В первую очередь, это связано с улучшением их характеристик, а именно, расширением диапазона измеряемых мощностей (до 100 Вт) при обеспечении требуемой линейности и предельно минимальных массогабаритных характеристиках, а также с повышением стабильности функционирования при интенсивном воздействии внешних неблагоприятных факторов (высокие температуры, повышенный радиационный фон, химически агрессивные среды и т. п.) [1].

В настоящее время для измерения СВЧ-мощности широко используются тепловые датчики (терморезистивные, термопарные и др.) [2]. Основные недостатки таких датчиков обычно связаны с невысокими эксплуатационными характеристиками, а именно: малой предельно допустимой мощностью измеряемого сигнала, большой инерционностью процесса измерения, невысокой точностью, а также большими массами и габаритными размерами измерительной системы в целом. Невысокие характеристики таких измерителей связаны с различными факторами, основными из которых являются применяемые полупроводниковые материалы для их изготовления и конструктивные решения.

Таким образом, создание подобных измерителей СВЧ-мощности предполагает использование полупроводниковых материалов с высокими электрофизическими характеристиками (высокой подвижностью носителей заряда, высокой теплопроводностью). Этим требованиям в большой степени отвечает полупроводниковый карбид кремния [3]. Еще одной задачей при создании измерителей СВЧ-мощности является разработка их принципа работы, среди которых можно выделить работу на основе тепловых и гальваномагнитных эффектов. Как правило, первые обладают высокой чувствительностью и большой инерционностью, динамический диапазон работы таких измерителей ограничен сотнями милливольт. В основе действия гальваномагнитных измерителей лежит высокочастотный эффект Холла или радиоэлектрический эффект [4], который характеризуется очень малой постоянной времени релаксации ($\tau \sim 10^{-12}$ с) и соответственно безынерционностью процесса, что связано с возможностью работы в области сверхвысоких частот ($1 \div 10$ ГГц) и в широком интервале температур (от -100°C до 300°C).

В наиболее простом случае радиоэлектрический эффект представляет собой взаимодействие электромагнитной волны со свободными носителями заряда в полупроводнике, ЭДС, возникающая в проводящей среде, связана с анизотропией функции распределения электронов. Ее возникновение может быть обусловлено силой Лоренца (высокочастотный эффект Холла), т. е. динамическим действием, а также градиентом электромагнитного поля, действие которого, в частности, проявляется в неоднородном разогреве среды вдоль направления вектора Умова–Пойнтинга. Рассматривая теоретические модели радиоэлектрического эффекта, можно определить условия преобладания увлекающего механизма радиоэдс над неоднородно разогревающим (градиентным) механизмом возникновения ЭДС. В наиболее простом случае взаимодействия полупроводника с электромагнитным полем температура электронов и фононов локально одинакова. Полная система уравнений для нахождения ЭДС в

образце состоит из уравнений Максвелла и уравнения теплопроводности, источником в котором служит джоулево тепло, выделяемое в полупроводнике при прохождении плоской электромагнитной волны. Уравнения Максвелла, описывающие распространение электромагнитного поля, дополняются макроскопической связью между током, электрическим полем и градиентом температуры. Последнее необходимо для учета термоэлектродвижущих сил. Поток тепла в этом приближении зависит не только от градиента температуры, но и от плотности тока. Для сравнительно низких частот ($\omega = 5, 7 \cdot 10^{10} \div 2, 5 \cdot 10^{11}$ Гц) можно использовать макроскопические уравнения. Уравнение теплопроводности дополняется граничными условиями, которые можно считать ньютоновскими [5], и тогда можно получить для ЭДС увлечения [6] и термоэдс следующие выражения:

$$V_{\parallel} = \frac{4\pi}{c^2} \mu_H W_0 \frac{1 - e^{-L\alpha}}{\alpha},$$

$$V_T = -\frac{\alpha_T}{\chi} \frac{W_0}{\alpha} \frac{h_1(1 - L\alpha - e^{-L\alpha}) + h_2(1 - e^{-L\alpha}(1 - L\alpha))}{h_1 + h_2 + L},$$

где μ_H — холловская подвижность носителей в полупроводниках, W_0 — плотность потока мощности, падающей на проводящую среду, α — коэффициент поглощения электромагнитной волны, α_T — коэффициент термоэдс, χ — коэффициент теплопроводности, h_1 и h_2 — коэффициенты обратной величины теплоотдачи, $h_1 = \chi/(4ST)$, S — постоянная Стефана–Больцмана. При $h_1 = h_2 = 0$ имеем $V_T = 0$. Это значит, что в случае хорошего теплоотвода с обеих сторон поверхности полупроводниковой пластины термоэдс не вносит вклад в радиоэлектрический эффект.

К достоинствам измерителей СВЧ-мощности, работающим на радиоэлектрическом эффекте, относятся непосредственное прямое измерение проходящей СВЧ-мощности, так как $V_T = 0$, что, в свою очередь, при правильном подборе параметров полупроводникового материала и конструкции самих измерителей приведет к улучшению их характеристик: высокое быстродействие, высокая чувствительность при малой инерционности, улучшенные массогабаритных показателей систем измерения мощности за счет отсутствия ответвителя и ослабителя сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Модель космоса./ Под ред. М. И. Панасюка, Л. С. Новикова. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007, 1144 с.
2. Билько М. И., Томашевский А. К., Шаров П. П. Измерение мощности на СВЧ. М.: Советское радио, 1976, 165 с.
3. Водаков Ю. А., Ломакина Г. А., Мозов Е. Н. Карбид кремния, легированный алюминием и галлием. — В кн.: Свойства легированных полупроводников. М.: Наука, 1977, с. 48–53.
4. Курганская Л. В. Свойства гетероструктур карбида кремния на кремнии и изоляторе в области сверхвысоких частот. Дисс. на соискание уч. ст. канд. физ.-матем. наук, 2009, 122 с.
5. Каганов М. И., Шапиро А. А. О влиянии термоэлектрических сил на радиоэлектрический эффект в проводниках. — ФТТ, 1970, т. 12, в. 10, с. 3019–3021.
6. Гуляев Ю. В. О возникновении постоянной ЭДС при распространении электромагнитной волны в проводящей среде. — Радиотехника и электроника, 1968, т. 13, № 4, с. 688–694.