

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ СВЧ С ПОМОЩЬЮ ДИГАДЕКТОРОВ ПРИ НАЛИЧИИ ГАРМОНИК В ИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ТРАКТЕ

С. И. Гечяускас, Ю. К. Пожела

В и л ь н ю с

Введение

Исследования явлений разогрева носителей тока в полупроводниках, проводимые в Советском Союзе и за рубежом, при-

вели к созданию полупроводниковых СВЧ приборов, таких как генератор Ганна, смеситель и генератор гармоник, детектор СВЧ, измеритель СВЧ мощности высокого уровня. Некоторые из них работают с использованием эффекта возникновения термо-э. д. с. горячих носителей (ГН) при разогреве их сильным электрическим полем СВЧ: детекторы, смесители, умножители частоты и один из измерителей мощности, точнее, датчик мощности [1], называемый дигадектором.

Наряду с хорошими он обладает и отрицательным свойством — чувствителен к гармоникам сигнала, что снижает точность измерений. В данной работе рассматриваются способы снижения погрешностей измерения пиковой мощности основной частоты при наличии гармоник, что наблюдается в большинстве практических случаев.

Дигадектор в качестве датчика мощности СВЧ

Дигадектор представляет собой самостоятельный полупроводниковый прибор, который выдает импульс, подобный огибающей СВЧ сигнала, с амплитудой, зависящей от разности напряженности электрического поля у рабочего («горячего») и периферийного («холодного») контакта. Принцип работы дигадектора основан на использовании термо-э. д. с. ГН, возникающей при наличии градиента концентрации носителей тока [2].

На рис. 1 схематически представлена конструкция волнового датчика мощности (модификация дигадектора). Он состоит из двух основных частей: полупроводникового элемента с невыпрямляющими контактами и волновода, содержащего токосъемник для соединения «горячего» контакта полупроводникового элемента с измерительной схемой. «Холодный» контакт соединен со стенкой волновода.

Предположим, что напряженность электрического поля у «горячего» контакта $E = E_m$, у «холодного» $E = 0$. Тогда термо-э. д. с. ГН U_T пропорциональна E_m^2 для случая сравнительно слабых полей ($E < 1$ кв/см). Так как для волны H_{10} в прямоугольном волноводе $P \sim E^2$, зависимость $U_T(P)$, называемая вольтваттной характеристикой, имеет линейный начальный участок. При сильных полях ($E > 1$ кв/см) зависимость $U_T(P)$ имеет вид

$$U_T = \frac{\chi_0}{e} (g_1 P_m^{\frac{1}{2}} - 1) \quad (1)$$

для германия и

$$U_T = \frac{\chi_0}{e} (g_2 P_m^{\frac{2}{3}} - 1) \quad (2)$$

для кремния. Здесь χ_0 — высота потенциального барьера у контакта; g_1 и g_2 — коэффициенты, учитывающие свойства полупроводника и связь E от P конкретного волновода. На-

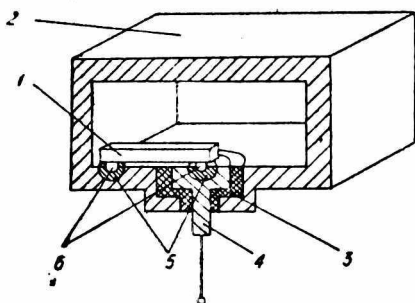


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции волноводного датчика мощности СВЧ: 1 — полупроводниковый элемент; 2 — волновод; 3 — изоляционная втулка; 4 — токосъемник; 5 — припой; 6 — металлические контакты полупроводникового элемента.

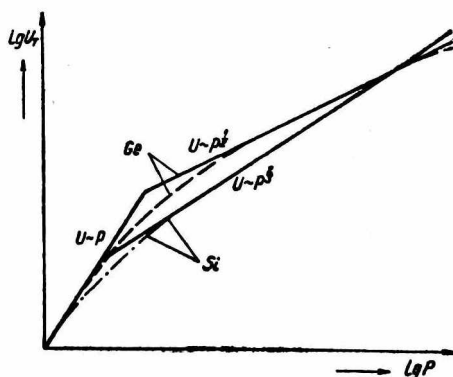


Рис. 2. Качественный ход вольт-ваттных характеристик волноводных датчиков мощности с чувствительными элементами из разных полупроводников. Сплошные линии — расчетные, пунктирные — экспериментальные.

пример, для прямоугольного волновода сечением ab в случае использования $n - Ge$ и $n - Si$

$$g_1 = \left(\frac{8 e^2 \tau \tau}{3 \pi m^* k T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\xi \frac{4 \lambda b}{ab \lambda} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

$$g_2 = 1,14 \left(\frac{2 e^2 \tau \tau}{3 m^* k T_0} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\xi \frac{4 \lambda b}{ab \lambda} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (4)$$

где e — заряд электрона; m^* — эффективная масса носителя тока; τ и τ — времена релаксации импульса и энергии, соответственно, в очень слабом электрическом поле; k — постоянная Больцмана; T_0 — абсолютная температура кристалла; ξ — волновое сопротивление свободного пространства; λ_b и λ — длина волны в волноводе и свободном пространстве.

На рис. 2 качественно показаны теоретические и реальные вольт-ваттные характеристики дидаекторов.

Ввиду того, что термо-э. д. с. ГН возникает под воздействием электрического поля, выходной сигнал дидаектора зависит от КСВН в измерительном тракте. Таким образом, измерение

проходящей мощности одним дигадектором возможно в согласованном тракте.

Когда основной сигнал СВЧ содержит гармоники, то наряду с термо-э. д. с. ГН в полупроводниковом элементе возникает другая э. д. с., которую называют гармо-э. д. с. Рассмотрим условия возникновения этой э. д. с. [3]. Суммарное поле основной частоты и одной из четных гармоник в общем случае является несимметричным — его пиковые значения в положительные и отрицательные полупериоды основной частоты могут быть неодинаковыми. Такое поле, будучи приложенным к симметричному нелинейному элементу (в нашем случае — полупроводнику), дает гармоток или (в режиме холостого хода) постоянную электродвижущую силу — гармо-э. д. с. В случае нечетных гармоник пиковые значения поля имеют одинаковую величину, и от них гармо-э. д. с. самостоятельно не возникает.

Гармо-э д. с. U_r зависит от соотношения начальных фаз гармонических составляющих электрического поля. Так как соотношение фаз в волноводе вследствие дисперсии электромагнитных волн меняется, то при передвижении полупроводникового датчика вдоль волновода, например, располагая его в плоскостях A , B и C , возникающая гармо-э. д. с. периодически изменяет амплитуду и знак. Периодичность гармо-э. д. с. в случае бегущих волн выражается [3]

$$\Delta x = \left(\frac{1}{\lambda_{nb}} - \frac{n}{\lambda_{1b}} \right)^{-1}, \quad (5)$$

где λ_{nb} — длина волны n -й гармоники в волноводе; λ_{1b} — длина волны основной гармоники в волноводе.

Термо-э. д. с. может или складываться с термо-э. д. с. ГН, или вычитаться из нее в зависимости от расположения дигадектора вдоль волновода, так как термо-э. д. с. горячих электронов в согласованном тракте не зависит от места расположения дигадектора.

Методы уменьшения погрешности от влияния гармоник при измерениях мощности

Уменьшить погрешность измерения пиковой мощности, обусловленную гармониками, можно несколькими способами.

1. Простейший метод — подавлять гармоники фильтром нижних частот до уровня, который практически не влияет на работу дигадектора, т. е. когда P_1/P_2 40 дБ (P_1 и P_2 — мощности первой и второй гармоник соответственно. Рассматривается только вторая гармоника, поскольку более высокие четные гармоники обычно незначительны). Применяемые фильтры подавляют гармоники сигналов трехсантиметрового диапазона

на 20—30 дб. Во многих практических случаях этого достаточно, если допускаются потери мощности основной частоты, составляющие около 1 дб. Например, при измерении параметров волноводных четырехполюсников прямые и обратные потери отсчитываются в относительных единицах. Абсолютное значение мощности не столь важно и может быть восстановлено изменением мощности генератора. В данном случае конструкция датчика мощности, включающая фильтр, становится более громоздкой. Предельная пиковая мощность, которую можно измерять, ограничивается возможностями фильтра. Этот недостаток проявляется еще заметнее, когда используются волноводы больших сечений, например, $220 \times 104 \text{ мм}^2$. Стоимость фильтра становится в несколько раз больше, чем дигадектора.

2. Из анализа гармо-э. д. с. выясняется, что при расположении вдоль волновода двух дигадекторов, разнесенных на расстояние $(2n+1) \Delta x/2$, на них возникает гармо-э. д. с. противоположных знаков или она будет равна нулю. Суммарные сигналы на дигадекторах U_1 и U_2 следующие:

$$U_1 = U_{1г} + U_{1г}; U_2 = U_{2г} - U_{2г} \dots$$

Нетрудно видеть, что с помощью суммарной схемы, позволяющей изменять коэффициент передачи одного сигнала k так, чтобы выполнялось условие $|U_{1г}| = k|U_{2г}|$, получается суммарный сигнал U , содержащий только э. д. с. ГН. Данная схема компенсации имеет недостаток — она частотнозависима.

Компенсация гармо-э. д. с. достигается и при расположении двух дигадекторов в одной плоскости, но на противоположных широких стенках прямоугольного волновода. В этом случае компенсация не зависит от частоты сигнала, поэтому она предпочтительнее для практического использования.

Экспериментально исследовались оба варианта компенсации гармо-э. д. с. В тракт включался полупроводниковый генератор гармоник, с помощью которого изменялся уровень P_1/P_2 , сжимной волновод, изменяющий фазовое соотношение сигналов первой и второй гармоник, исследуемый датчик, индикатор гармоник и согласованная нагрузка. Измерения проводились в волноводе сечением $23 \times 10 \text{ мм}^2$ при $P_1 = 35 \text{ квт}$. Относительный уровень гармоник достигал $P_1/P_2 = 30 \text{ дб}$. В случае расположения дигадекторов на расстоянии $\Delta x/2$ друг от друга изменение суммарного сигнала не превышало $\delta = \pm 11\%$. Когда дигадекторы располагались в одной плоскости, изменение сигнала не превышало $\delta = \pm 8\%$, а при $P_1/P_2 = 35 \text{ дб}$ $\delta = \pm 4\%$.

Датчик мощности с двумя дигадекторами был испытан при $P_1 = 220 \text{ квт}$ в волноводе $28,5 \times 12,6 \text{ мм}^2$ с сигналами, генерируемыми магнетроном МИ-84-1. Из-за высокого уровня мощности отношение P_1/P_2 точно не было определено. Изменение выходного сигнала датчика не превышало $\delta = \pm 8\%$.

3. Компенсация гармо-э. д. с. в полупроводниковом элементе. Гармо-э. д. с. возникает в объеме полупроводника, а термо-э. д. с. ГН — в приконтактной области, где создается градиент концентрации носителей тока. Поэтому, когда контакты нанесены на эквипотенциальную относительно U_r поверхность полупроводника, измеренная на них гармо-э. д. с. U_r , по-видимому, будет незначительна.

Реализация данной идеи возможна при помощи полупроводникового элемента с двумя различными градиентами концентрации носителей, т. е. обладающего $n - n^+$ переходом в одной приконтактной области и $p - n$ переходом — в другой. Известно, что в таком случае возникающие термо-э. д. с. ГН в приконтактных областях будут иметь противоположные знаки [1], а общая э. д. с. равна их сумме. При симметричном расположении полупроводникового образца в волноводе гармоники в образце будут также симметричны и противоположных направлений, что приводит к их взаимной компенсации.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Гечяускас, Ю. К. Пожела, К. К. Репшас. ПТЭ, 2, 1969, 121—124; 3, 1970, 182—183; Вопр. РЭ, сер. РИТ, 6, 1968, 55—61.
2. Ю. К. Пожела, К. К. Репшас. Лит. физ. сб., 6, 4, 1966, 55—61.
3. Т. Я. Банис, А. Ю. Даргис, Ю. К. Пожела. «Радиотехника и электроника», 15, 8, 1970, 1695—1700.