

ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПРОХОДЯЩЕЙ ИМПУЛЬСНОЙ СВЧ МОЩНОСТИ

А. С. Паужа, Ю. К. Пожела

Вильнюс

1

Известно, что подвижность носителей тока в полупроводниках меняется в сильных электрических полях [1]. Степень изменения подвижности зависит от природы полупроводника преобладающих механизмов рассеяния. В достаточно чистых ковалентных полупроводниках, таких, например, как германий и кремний, при комнатной температуре подвижность носителей тока уменьшается с полем. Следовательно, сопротивление образца, электрические параметры которого определяются объемными свойствами материала, увеличивается. Изменение электропроводности симметрично относительно операции инверсии электрического поля \vec{E} , т. е. $\rho(\vec{E}) = \rho(-\vec{E})$, где ρ — удельное сопротивление образца [2]. Это значит, что полупроводниковый образец, в котором подвижность носителей тока является функцией напряженности электрического поля, есть симметричное нелинейное сопротивление. Следует отметить, что симметричность сопротивления может быть обеспечена лишь при наличии линейных по току контактов.

Сильное переменное электрическое поле также вызывает изменение электропроводности. Однако при высоких частотах, когда не выполняется условие $\omega\tau \ll 1$, где ω — круговая частота электрического поля и τ — время релаксации импульса, проявляется определенная инерционность изменения электропроводности [3]. Инерционность этих процессов ограничивает частотную область применимости данных элементов. Для электронного германия и кремния при комнатной температуре граница составляет $2 \cdot 10^{10}$ гц.

Если на такой элемент (датчик) подать слабое постоянное поле E_0 и сильное переменное с амплитудой \vec{E}_m , то под действием общего поля $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_m \sin \omega t$ через датчик потечет ток. Плотность среднего тока j_0 , как показывают расчеты [1], будет пропорциональна E_0 (при условии, что $E_0 \ll E_m$). Поэтому отношение E_0/i_0 , где $i_0 = j_0 S$ (S — поперечное сечение датчика) — постоянный ток, протекающий через датчик, можно считать «сопротивлением постоянному току», которое будет функцией амплитуды переменного поля E_m , т. е. $E_0/i_0 = R^* = f(E_m)$.

Итак, каждой амплитуде E_m напряженности переменного поля соответствует определенное сопротивление постоянному

току. По изменению этого сопротивления во время прохождения импульса СВЧ мощности по волноводному тракту, в котором помещен такой датчик, можно определить амплитуду СВЧ поля, а следовательно, и импульсную мощность.

Чтобы датчики, работающие на принципе изменения электропроводности в сильных электрических полях (то же: на разогреве носителей тока; горячих электронах), могли применяться для измерения проходящей импульсной СВЧ мощности, они должны обладать симметричной вольтамперной характеристикой относительно направления электрического поля; малой инерционностью разогрева носителей тока; большой чувствительностью к напряженности электрического СВЧ поля; малым коэффициентом стоячей волны (КСВН); малой абсорбцией СВЧ энергии, малым нагревом решетки датчика при прохождении по тракту большой СВЧ мощности; способностью выдерживать сильные СВЧ поля; стабильными во времени характеристиками; малой зависимостью выходного сигнала от окружающей температуры и температуры датчика.

Из числа выпускаемых промышленностью полупроводниковых материалов наиболее подходящими являются электронный германий и кремний. Электронному германию характерна большая чувствительность к сильному электрическому полю, но он не может работать при температурах, значительно превышающих комнатную, так как собственная проводимость начинается примерно при 40—60°C (у кремния 120—200°C). Поэтому датчики изготавливались из выпускаемого промышленностью электронного кремния. Их следует изготавливать из более высокоомного материала, ибо датчики из низкоомного материала создают в трактах большие КСВН и затухание. В табл. 1 и 2 приведены результаты измерений КСВН и затухания с датчиком из материала с разным удельным сопротивлением. В них ясно видна зависимость КСВН и затухания от

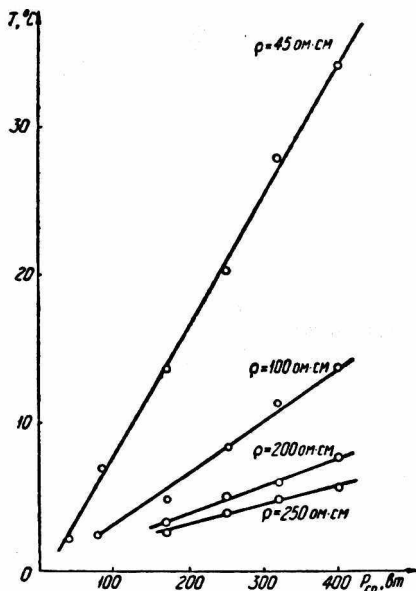


Рис. 1. Нагрев датчиков из кремния с разным ρ от СВЧ мощности.

ρ материала. Из этого ряда выделяются датчики с $\rho = 20 \text{ ом} \cdot \text{см}$. Но это, по-видимому, связано с влиянием данного датчика на перераспределение стоячих волн в волноводном тракте, так как измерения проводились на промышленной установке. За высокоомный материал говорят и результаты измерений на поглощение и нагрев датчиков от СВЧ энергии, которые приведены на рис. 1.

Таблица 1

Высота датчика, мм	КСВН			
	$\rho = 7,5$ ом · см	$\rho = 20$ ом · см	$\rho = 40$ ом · см	$\rho = 250$ ом · см
10	2,2	1,53	1,745	1,556
8	2,1	1,5	1,595	1,5
6	1,79	1,345	1,46	1,46
4	1,54	1,27	1,305	1,35
2	1,13	1,135	1,154	1,22

Таблица 2

Высота датчика, мм	КСВН			
	$\rho = 7,5$ ом · см	$\rho = 20$ ом · см	$\rho = 40$ ом · см	$\rho = 250$ ом · см
10	4,6	1,8	1,0	0,4
8	3,4	1,22	0,78	0,4
6	1,91	0,68	0,6	0,28
4	0,85	0,42	0,3	0,2
2	0,1	0,16	0,1	0,1

Выраженной зависимости выходного сигнала от удельного сопротивления материала не обнаружено. Электрическая прочность датчиков и волноводной секции с датчиками определяется не свойствами материала, а конструкцией датчика и волноводной секции. Инерционность изменения электропроводности и чувствительности датчика к электрическому СВЧ полю также не зависит от удельного сопротивления исходного материала; инерционность обуславливается в основном природой полупроводника, а чувствительность — природой и конструкцией датчика.

Таким образом, наиболее подходящим материалом для датчиков является электронный кремний с удельным сопротивлением $\rho = 100\text{—}300 \text{ ом} \cdot \text{см}$. Но следует отметить, что чем выше ρ , тем труднее изготовить линейные по току контакты.

Разработанная конструкция датчиков представляет возможность установить их на любой из стенок прямоугольного волновода или в коаксиальный волновод. Размеры датчиков (до определенных критических величин) не связаны с размерами волноводов, что дает возможность применять датчики одной и той же конструкции в волноводах разных сечений. Конструкция выполнена на резьбовых соединениях с герметизацией тракта у внутренней поверхности волновода. Датчики можно эксплуатировать в трактах с избыточным давлением до 7 атм.

Из целого ряда характеристик датчиков наиболее важными являются статистическая вольтамперная $I=f(U)$, температурная $\Delta U=f(T)$ и ваттвольтная $\Delta U=f(P_{\text{имп}})$.

Как уже отмечалось в 1 части статьи, носители тока в датчике подвергаются воздействию суммарного поля: постоянного и переменного. Статическая вольтамперная характеристика (ВАХ) снимается при слабых постоянных электрических полях, мало нагревающих носители тока (примерно до полей 150—200 в/см).

Наши эксперименты показали, что изменение сопротивления от эффекта нагрева носителей тока при таких полях составляет 3—5%.

Анализ ВАХ показывает, что характеристики не являются линейными. Нелинейность обусловлена тем, что ток, протекая через датчик, нагревает его. Нелинейность усугубляется еще и тем, что сопротивление датчика с температурой связано нелинейной зависимостью. В условиях, когда датчик нагревается протекающим через него током, статическое сопротивление датчика зависит от установившегося температурного режима, т. е. от выделяющейся мощности и условий охлаждения. Каждый датчик, установленный в волновод, перед измерением калибруется установкой начального напряжения U_0 на нем, которое непосредственно связано с сопротивлением датчика.

Дополнительный нагрев этим постоянным током ведет к дополнительным ошибкам при измерении. Во время измерений датчик также подвергается нагреву и энергией СВЧ. Поэтому при расчетах цепей питания датчика следует подобрать такие токи, которые бы как можно меньше нагревали датчики. Проведенные исследования показали, что цепи надо конструировать из расчета, чтобы протекающий по датчику ток создавал напряжения на датчике не более 20 в. Такие токи вызывают изменение сопротивления датчика, не превышающее 3%.

Известно, что подвижность электронов в слабых и сильных электрических полях зависит от температуры решетки [4]. Изменение подвижности приводит к изменению выходного сигнала датчика ΔU . Была исследована зависимость выходного

сигнала ΔU в СВЧ полях и изменение этого сигнала от температуры для датчика из $n-Si$ с $\rho=200 \text{ ом}\cdot\text{см}$. Датчик был включен в схему. Напряжение U_0 устанавливалось после каждого изменения температуры и поддерживалось равным 5 в. Исследования показали, что с понижением температуры при тех же полях выходной сигнал сильно увеличивается, меняясь 2—3 раза в заданном интервале температур. Кроме того, с изменением температуры меняется и чувствительность датчика.

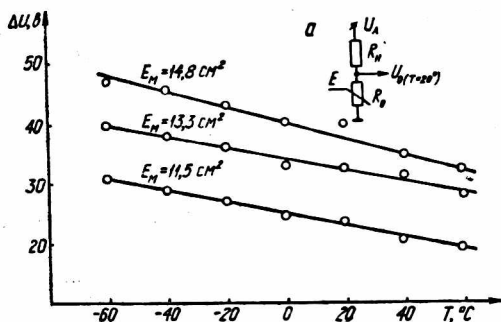


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала ΔU от температуры для датчика, включенного по термоавтокомпенсационной схеме при разных напряженностях E_m электрического поля.

Так, при температуре -60°C чувствительность составляет 1 в/кв, при $+20^\circ\text{C}$ — 0,48 в/кв, при $+60^\circ\text{C}$ — 0,3 в/кв. Изменение выходного сигнала и чувствительности в диапазоне рабочих температур влечет за собой дополнительные ошибки при измерении мощности. Во избежание этих погрешностей применяются схемы термокомпенсации.

Напряжение U_0 на датчике устанавливается с учетом температурного хода R_0 . Напряжение $U_0=5 \text{ в}$ устанавливается при R_0 , соответствующем величине сопротивления датчика при $+20^\circ\text{C}$ и не регулируется в течение всего процесса измерения. При таком режиме измерения выходной сигнал меняется в пределах $+17,5$ и -20% при температуре соответственно -60 и $+60^\circ\text{C}$. Изменение чувствительности датчиков также уменьшается и составляет соответственно 0,5 и 0,4 в/кв. Температурный ход выходного сигнала датчика, включенного по автокомпенсационной схеме, представлен для трех значений амплитуды E_m СВЧ поля (рис. 2).

На основании сказанного можно сделать вывод, что датчики из электронного кремния обладают температурным изме-

нением выходного сигнала и применение их без схем компенсации затруднительно. Использование самой элементарной автокомпенсирующей схемы дает большой положительный результат. При проведении измерений в лабораторных условиях, где температура сохраняется в пределах $\pm 20^\circ\text{C}$, погрешность от температурного хода составляет меньше 5%. Применение термоавтокомпенсирующих мостовых схем позволяет уменьшить погрешность до 1—2%.

Практический интерес представляет ваттвольтные характеристики, т. е. зависимость выходного сигнала ΔU от падающей импульсной СВЧ мощности $P_{\text{имп}}$. Ввиду того, что датчики реагируют не на мощность, а на напряженность электрического поля, ваттвольтные характеристики являются нелинейными, так как поле E_m и импульсная мощность $P_{\text{имп}}$ связаны между собой зависимостью $E_m = A\sqrt{P_{\text{имп}}}$, где A — коэффициент, зависящий от длины волны и параметров волновода. Величина выходного сигнала ΔU в данном случае составляет примерно 3—10 в при изменении импульсной мощности $P_{\text{имп}} = 50—250$ квт.

Наибольшая измеряемая импульсная мощность определяется параметрами волновода и конструкцией датчиков. Для примера проведены измерения мощностей до 24 Мвт при средней мощности до 18 квт. Наименьшая измеряемая мощность также зависит от волновода и конструкции датчика и составляет при пересчете на напряженность поля $(1—3) \cdot 10^2$ в/см.

Кроме рассмотренных характеристик, существует ряд других, но в статье с ограниченным объемом все рассмотреть невозможно. Поэтому в заключение приведем только некоторые цифры, характеризующие датчики. Так, КСВН от датчика не превышает 1,05 для волновода сечением 23×10 мм² (для большего сечения еще меньше). Дополнительная погрешность от КСВН тракта порядка 10% с величиной КСВН=3,0 при условии расположения двух датчиков на расстоянии $\lambda/4$. Величина выходного сигнала может быть в пределах 0,2—20—40 в. Интервал рабочих температур $-60—+60^\circ\text{C}$. Выходное сопротивление датчиков зависит от удельного сопротивления материала и конструкции самого датчика. Оно может лежать в пределах 1—100 ком. Разработанные датчики позволяют проводить измерения импульсов длительностью 0,5—500 мксек. Величина абсорбируемой датчиком СВЧ мощности не превышает 0,05%. Датчики данной конструкции лишены основного недостатка, свойственного СВЧ диодам и несимметричным датчикам на горячих электронах, так как выходной сигнал не зависит от высших гармоник СВЧ колебаний.

Авторы выражают благодарность сотрудникам, участвовавшим в подготовке и проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Конуэлл. Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях. Изд-во «Мир», М., 1970.
 2. Дж. Най. Физические свойства кристаллов. М., 1960.
 3. Т. Я. Банис, Ю. К. Пожела. Лит. физ. сб., 8, 209 (1968).
 - Т. Я. Банис, А. Ю. Даргис, Ю. К. Пожела. ФТП, 3, 1803 (1969).
 4. В. А. Voitchenko and V. M. Vasetski. Sol. State Phys, 7, N 7 (1965).
-