

УДК 621.317.313+621.317.318

**ДАТЧИКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАНО- И СУБНАНОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ТОКА**

Е.Х. Бакшт, А.Г. Бураченко, И.Д. Костыря, М.И. Ломаев, В.А. Панарин, Д.В. Рыбка, В.Ф. Тарасенко

Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

E-mail: VFT@loi.hcei.tsc.ru

*Приведена конструкция датчиков тока с шунтами на основе полосковых линий и на основе чип-резисторов для измерения нано- и субнаносекундных импульсов тока. Показано преимущество этих датчиков по сравнению с датчиками тока на основе резисторов марки ТВО.*

**Ключевые слова:**

*Датчик тока, измерительный токовый шунт, чип-резистор, полосковая линия.*

Как известно, одним из способов измерения импульсных токов является снятие осциллограмм падения напряжения на измерительном сопротивлении (шунте) с последующим определением параметров зарегистрированного импульса. Падение напряжения на низкоомном шунте имеет две составляющие:

$$U(t) = U_R(t) + U_L(t) = i(t) \cdot R_{ш} + L \cdot di(t)/dt,$$

где  $i(t)$  – ток,  $R_{ш}$  – активное сопротивление шунта,  $L$  – индуктивность шунта в схеме замещения. В общем случае [1]  $L = L_{вз} + L_{вн}$ , где  $L_{вз}$  – взаимная индуктивность измерительной цепи и контура измеряемого тока,  $L_{вн}$  – внутренняя индуктивность шунта.

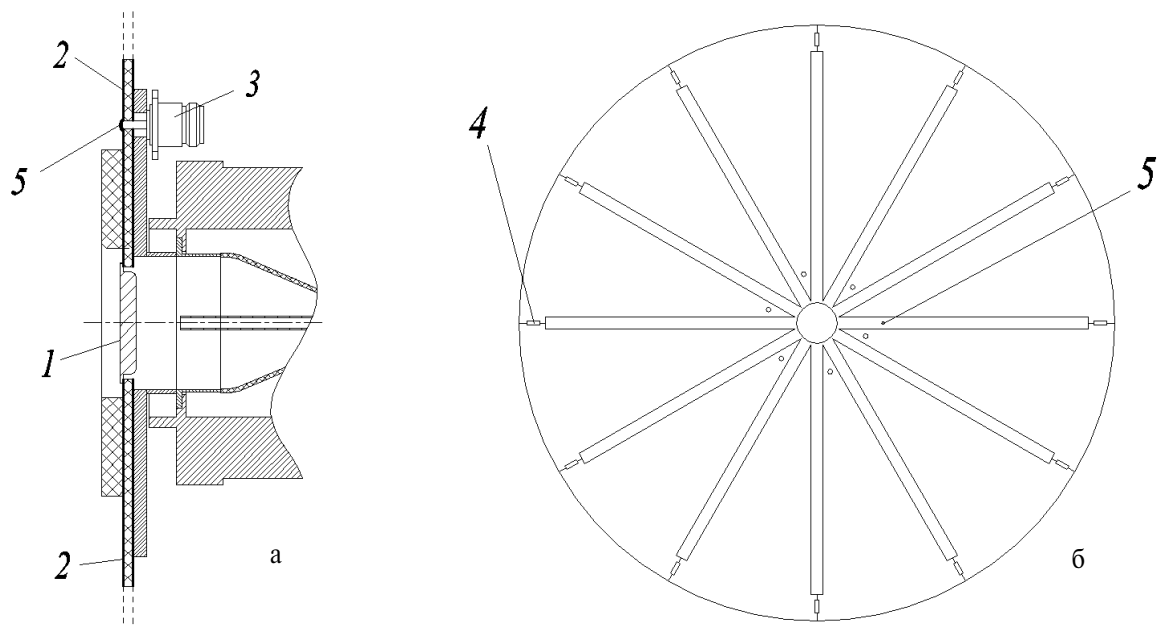
Для измерения импульсных токов с большими скоростями роста/спада тока применяют малоиндуктивные шунты. Часто такие шунты изготавливают из соединенных параллельно резисторов марки ТВО, например, в случае измерения тока газового разряда или тока электронного пучка. Сопротивление этих шунтов обычно составляет  $\sim 0,1 \dots 0,01$  Ом и позволяет измерять токи величиной до десятков-сотен килоампер. Вместе с тем, уже много лет выпускают чип-резисторы, обладающие существенно лучшими частотными характеристиками, чем резисторы ТВО. Кроме того, с целью улучшения частотных характеристик можно конструировать низкоомные шунты на основе соединенных параллельно полосковых линий.

Цель работы – показать преимущество шунтов на полосковых линиях и на основе чип-резисторов по сравнению с шунтами на основе резисторов марки ТВО.

Конструкция малоиндуктивных датчиков тока с шунтами на основе промышленно выпускаемых резисторов, предназначенных для измерения тока импульсного газового разряда или тока импульсно-электронного пучка, хорошо известна. Как правило, это коллектор (в качестве коллектора при измерении тока разряда может выступать заземляемый через шунт электрод) соответствующей формы, по краям которого припаиваются одинаковые резисторы (например, марки ТВО или другого типа). Второй конец резисторов припаивается к заземленной шине. Электрический сигнал снимается с помощью радиочастотного кабеля. В эксперимен-

тах использовались датчики тока с шунтами на основе резисторов марки ТВО и чип-резисторов. Чип-резисторы при выборе соответствующих размеров и номиналов позволяют работать в диапазоне частот вплоть до единиц ГГц [2]. К сожалению, авторам не удалось обнаружить в литературе сведения о частотной зависимости сопротивления резисторов марки ТВО. Первый датчик тока содержал шунт, состоящий из соединенных параллельно 100 резисторов ТВО-0,125 с сопротивлением  $R_0 = 10$  Ом каждый. Величина сопротивления отдельного резистора  $R_0$  и его геометрические размеры выбраны таким образом, чтобы обеспечить возможно меньшую величину постоянной времени шунта  $L_0/R_0$  ( $L_0$  – величина индуктивности одного резистора). Второй датчик тока содержал шунт, состоящий из соединенных параллельно 88 чип-резисторов с сопротивлением 3,3 Ом каждый и размерами корпуса  $3,2 \times 1,6 \times 0,55$  мм (маркировка размеров корпуса 1206). Оба датчика были изготовлены с высокой (близкой к максимальной) плотностью заполнения резисторами пространства между коллектором и заземленной шиной. Измерялся ток наносекундного разряда в воздухе при атмосферном давлении. Разряд зажигался в газонаполненной диоде с помощью генератора СЛЭП-150 [3], соединенного с диодом через передающую линию с волновым сопротивлением 100 Ом. Для регистрации сигналов использовался цифровой осциллограф DPO70604 (6 ГГц,  $25 \cdot 10^9$  выборок/с).

Конструкция датчика тока с шунтом на полосковых линиях, который также использовался в экспериментах, изображена на рис. 1. Датчик состоял из коллектора – 1 и двенадцати радиально расходящихся микрополосковых линий – 2, с одной стороны соединенных с коллектором (рис. 1, а), а с другой стороны нагруженных на согласованные сопротивления – 4 величиной 2 Ом, набранных из соединенных параллельно пяти чип-резисторов с сопротивлением 10 Ом каждый (рис. 1, б). Эти полосковые линии образовывали шунт с сопротивлением  $R_{ш} = \rho/n$ , где  $\rho$  – волновое сопротивление полосковой линии,  $n$  – количество полосковых линий, образующих шунт. Они изготавливались из двусторонне-го фольгированного стеклотекстолита марки СОНФМ-2-18 толщиной 200 мкм, на одной стороне



**Рис. 1.** Конструкция датчика тока с шунтом на полосковых линиях: а) датчик тока (подсоединен к газонаполненному диоду), б) схематичное изображение шунта на полосковых линиях

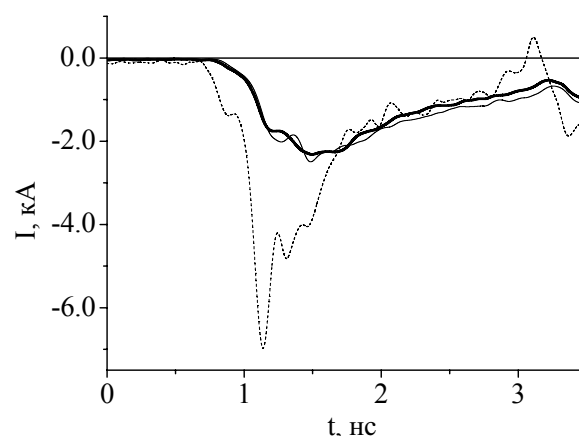
которого путем химического травления часть фольги была удалена и оставлены металлические полоски шириной 12 мм и длиной 270 мм. Расчет критической частоты для волн высших типов по формулам, приведенным в [4], показал, что такие полосковые линии позволяют работать в диапазоне частот вплоть до ~5 ГГц. При необходимости рабочий диапазон можно расширить до частот свыше 10 ГГц, используя более узкие полоски.

В центре стеклотекстолитового круга, на котором располагались полосковые линии, было вырезано отверстие диаметром 50 мм. Диск коллектора припаивался к полоскам. Электрический сигнал с шунта снимался с помощью радиочастотного коаксиального разъема N-типа – 3, присоединенного к одной из полосковых линий в точке – 5 (рис. 1, б), расположенной на расстоянии ~50 мм от места контакта полосковой линии с коллектором.

Непосредственно снять зависимость сопротивления датчиков тока от частоты измеряемого сигнала (на частотах >100 МГц) не представляется возможным из-за малой величины их сопротивления и сложностей, связанных с обеспечением равномерного растекания тока по коллектору. Поэтому был проведен эксперимент по измерению тока наносекундного разряда (о чем уже говорилось выше), позволяющий косвенным образом сравнить частотные диапазоны различных датчиков тока.

На рис. 2 приведена осциллограмма тока разряда, снятая с помощью шунта на резисторах марки ТВО (пунктирная линия). На ней хорошо видны выбросы, которые можно связать с падением напряжения на индуктивности шунта при больших значениях  $di/dt$  и с увеличением падения напряжения на активном сопротивлении шунта за счет скин-эффекта в объемном токопроводящем теле

резисторов. Применение в измерительном шунте вместо сопротивлений ТВО чип-резисторов, имеющих значительно меньшую индуктивность и тонкий токопроводящий слой, позволило свести к минимуму величину этих выбросов (рис. 2, тонкая линия). Приблизительно такой же результат достигается при использовании шунта на полосковых линиях (рис. 2, толстая линия). Это позволяет сделать вывод о том, что частотный диапазон использовавшихся шунтов на основе чип-резисторов и на полосковых линиях шире, чем частотный диапазон шунтов на основе резисторов марки ТВО.



**Рис. 2.** Осциллограммы тока разряда (усреднение по 20 импульсам), снятые с помощью шунта на резисторах марки ТВО (пунктирная линия), на чип-резисторах (тонкая линия) и на полосковых линиях (толстая линия)

Измерялся также ток короткого замыкания генератора. При измерении тока короткого замыкания датчиками тока на чип-резисторах и на полосковых линиях амплитуда тока совпала с расчетной амплитудой, определяемой как удвоенное отноше-

ние амплитуды падающей волны напряжения (измеренной с помощью емкостного делителя напряжения) к значению волнового сопротивления передающей линии. При измерении тока короткого замыкания датчиком на резисторах ТВО были получены завышенные более чем в 3 раза значения амплитуды тока по сравнению с расчетными.

С помощью шунтов на основе чип-резисторов и на полосковых линиях предпринималась также попытка измерять параметры сверхкороткого лавинного электронного пучка, генерируемого в наносекундных разрядах атмосферного давления [5]. Длительность такого пучка  $\leq 90$  пс на полувысоте. Однако из-за наличия индуктивности шунта и емкости между коллектором и фольгой газового диода не удается корректно измерить амплитуду тока пучка такой малой длительности. В этих условиях можно, тем не менее, измерять суммарный заряд пучка, проинтегрировав получившуюся осциллограмму тока [6]. Для определения распределения заряда по сечению электронного пучка применялся миниатюрный датчик тока, смонтированный на высокочастотном кабеле 5D-FB PEEG фирмы RadioLab. Он состоял из шунта на основе соединенных параллельно 12 чип-резисторов с сопротивлением 3,3 Ом каждый. Резисторы располагались

вместо участка оплетки на конце кабеля коаксиально внутренней изоляции и жиле кабеля и соединялись с одной стороны с оплеткой кабеля, а с другой стороны – с латунным коллектором диаметром 7 мм и толщиной 2 мм. Жила кабеля припаивалась к коллектору. Снаружи токовый датчик был закрыт дополнительным экраном. Длительность импульса тока пучка, регистрируемая с помощью такого миниатюрного датчика, составила  $\sim 100$  пс на полувысоте. Это совпадает с длительностью тока пучка, зарегистрированной с помощью датчика тока на основе 50-омной коаксиальной линии, описанного в [7].

Таким образом, датчики тока с шунтами на основе чип-резисторов и на основе полосковых линий имеют важные преимущества по сравнению с шунтами на основе резисторов марки ТВО – более широкий частотный диапазон и меньшие габариты (в случае чип-резисторов). Датчики тока с шунтами на основе полосковых линий, несмотря на большие размеры, позволяют работать в частотном диапазоне с верхней границей более 10 ГГц при выборе соответствующих параметров полосковых линий.

*Авторы благодарят А.И. Климова, И.В. Пегеля и Е.В. Балзовского за обсуждение и полезные советы.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. – М.: Энергия, 1980. – 136 с.
2. Data sheet. Chip resistors. Introduction. [Электронный ресурс]: Yageo Physcomp. Product Specification. V. 6. 2004. Режим доступа: [http://search.alkon.net/cgi-bin/pdf.pl?pdfname=yageo/smd\\_res/pyu-r\\_int\\_6d.pdf](http://search.alkon.net/cgi-bin/pdf.pl?pdfname=yageo/smd_res/pyu-r_int_6d.pdf), свободный.
3. Костыря И.Д., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. Ускоритель сверхкороткого лавинного электронного пучка СЛЭП-150 // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 4. – С. 159–160.
4. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / Под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.
5. Тарасенко В.Ф., Рыбка Д.В., Бакшт Е.Х. и др. Генерация и измерение субнаносекундных пучков электронов в газонаполненных диодах // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 2. – С. 62–68.
6. Грязнов М.И., Гуревич М.Л., Рябинин Ю.А. Измерение параметров импульсов. – М.: Радио и связь, 1981. – 216 с.
7. Бакшт Е.Х., Балзовский Е.В., Климов А.И. и др. Коллекторный узел для измерения тока пучка электронов субнаносекундной длительности // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 6. – С. 100–103.

*Поступила 07.10.2008 г.*