

09;12

Измерение параметров выходного излучения релятивистских СВЧ-генераторов резистивными датчиками на горячих носителях

© М.Б. Гойхман, Н.Ф. Ковалев, Н.Г. Колганов, А.В. Палицин

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
E-mail: kovalev@appl.sci-ppov.ru.

Поступило в Редакцию 8 января 2004 г.

Обращено внимание на опасность возникновения аномально больших ошибок при измерении мощных СВЧ-импульсов малой длительности полупроводниковыми детекторами на горячих носителях. Рассмотрены методы выделения сигналов ошибок и определения погрешности измерений.

Полупроводниковые детекторы на горячих носителях [1] оказались очень удобным диагностическим средством в релятивистской СВЧ-электронике [2–4] при измерении редко повторяющихся мощных импульсов малой длительности. Типичная схема подобных измерений показана на рис. 1. Она проста, удобна и мобильна, но в случае генераторов с дифракционными выводами энергии, в излучении которых одновременно присутствуют и высшие гармонические составляющие, с ней связаны дополнительные искажения формы регистрируемых импульсов [1]. С целью иллюстрации на рис. 2 приведены несколько осциллограмм с детектора в экспериментах с релятивистским ЛОВ-генератором 3-сантиметрового диапазона длин волн с выходной мощностью, не превышающей 300 MW, и с долей излучения на второй гармонике, меньшей чем 10^{-3} . Осциллограммы получены при неизменном режиме работы генератора и фиксированном положении антенн, но с отличающимися длинами приемного волноводного тракта. Если определять выходную мощность ЛОВ по обычной калибровочной кривой, то первому импульсу будет соответствовать мощность 300 MW (*a*), второму — 600 (*b*), третьему — 230 (*c*), четвертому — 150 MW (*d*). Объяснению происхождения столь существенных различий

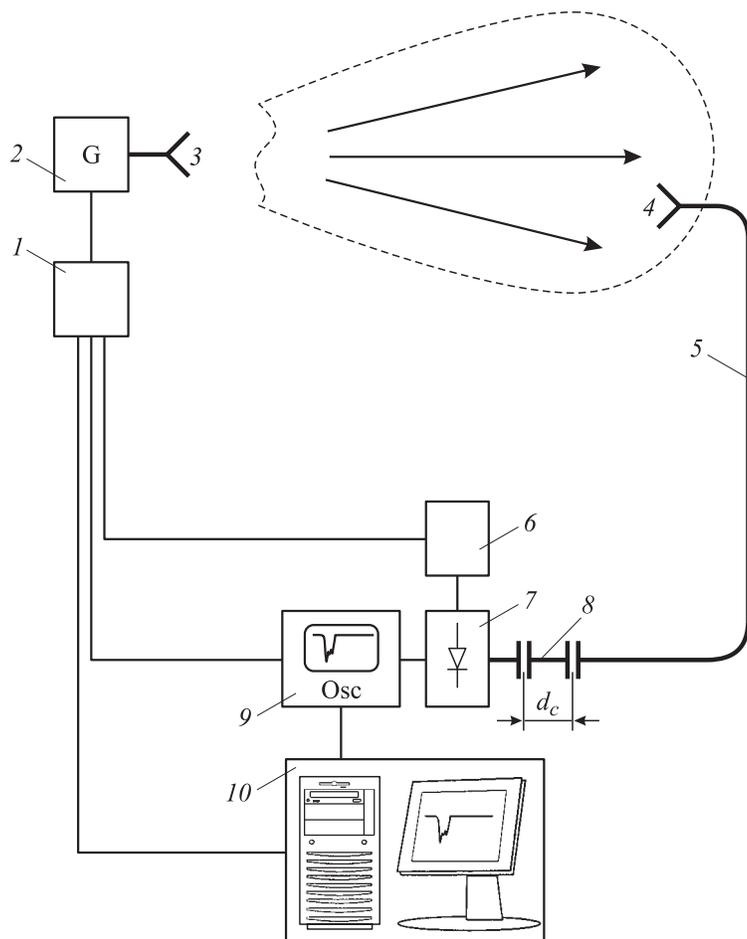


Рис. 1. Упрощенная схема измерения параметров выходного излучения мощного релятивистского СВЧ-генератора: *1* — блок управления, *2* — исследуемый СВЧ-генератор, *3* — излучающая антенна, *4* — приемная антенна, *5* — волноводный тракт, *6* — управляемый блок питания детектора, *7* — полупроводниковый детектор на горячих носителях, *8* — сменный отрезок волновода, *9* — осциллограф, *10* — блок регистрации и хранения полученной информации; пунктирной линией условно изображена диаграмма направленности излучающей антенны (3).

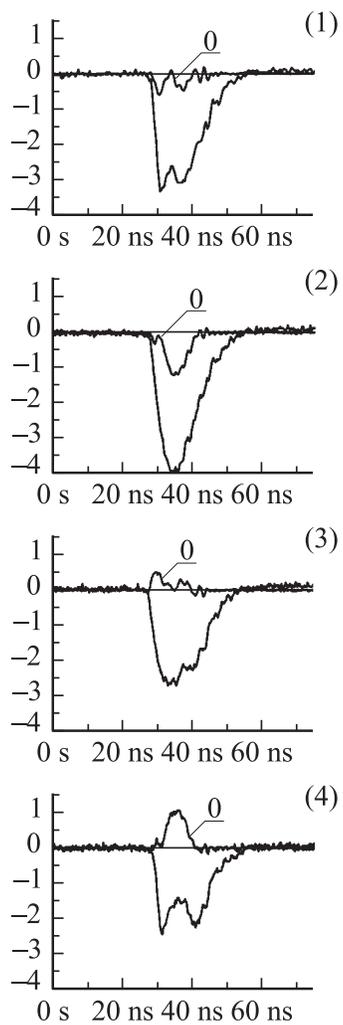


Рис. 2. Осциллограммы импульсов на выходе детектора при разной длине (d_c на рис. 1) сменной секции в приемном волноводном тракте: 1 — $d_c = 0$, 2 — $d_c = 2$, 3 — $d_c = 4$, 4 — $d_c = 6$ см; индексом „0“ отмечены осциллограммы сигналов ошибок, полученные при отключении питания детектора.

в формах импульсов и связанных с ними ошибок посвящено настоящее сообщение.

Свойства материала полупроводника описываются оператором электропроводности

$$j = \hat{j}[E], \quad (1)$$

где j — объемная плотность тока, E — электрическое поле. Обе величины считаются однонаправленными и являются знакопеременными функциями времени. Оператор $\hat{j}[E]$ нелинейный, антисимметричный ($\hat{j}[-E] = -\hat{j}[E]$) и в общем случае интегродифференциальный. В ограниченном диапазоне частот его можно представить в виде последовательного соединения нелинейного резистора (ρ) и внутренней индуктивности (l). Нелинейные свойства l здесь учитываться не будут, а для корректного ограничения диапазона рабочих частот ее величина принимается равной

$$l = \rho_0 \tau, \quad (2)$$

где ρ_0 — удельное сопротивление полупроводника на низкой частоте в слабых полях, τ — феноменологическое время релаксации электропроводности также в слабых полях. Например, для высокоомного электронного кремния при комнатной температуре $\tau \approx 10^{-12} - 10^{-10}$ с, в силу чего он считается одним из самых перспективных материалов для резистивных СВЧ-датчиков [1]. Согласно [1], электропроводность (ρ) кремния в широком диапазоне полей можно аппроксимировать вольт-амперной характеристикой

$$j_v = \arctg E_v, \quad (3)$$

где $j_v = \rho_0 j / E$ и $E_v = E / E$ — нормированные плотность тока и поле, а E — критическое значение поля, являющееся вместе с ρ_0 и τ основной характеристикой материала полупроводника.

С целью выяснения основных закономерностей в работе детектора удобно предположить, что полное поле состоит только из трех частей

$$E_v = E_0 + E_1 \cos \omega t + E_2 \cos(2\omega t + \phi), \quad (4)$$

а выходной сигнал пропорционален медленно изменяющейся плотности тока

$$j_{v0} = E_0 - \frac{1}{3} E_0^3 - \frac{1}{2} E_0 E_1^2 - \frac{1}{2} E_0 E_2^2 - \frac{1}{4} E_1^2 E_2 \cos \phi. \quad (5)$$

В (4) и (5): E_0 — постоянная часть поля; E_1 , E_2 и ϕ — медленно изменяющиеся в масштабе $2\pi/\omega$ заданные функции времени. При выводе (5) была использована не (3), а укороченная характеристика $j_v = E_v - 1/3E_v^3$.

В режимах измерения мощных импульсов малой длительности постоянное поле E_0 выбирается обычно небольшим [1] ($E_0 \ll E_1 \simeq 1$), поэтому в случае $E_2 = 0$ продетектированный сигнал

$$j_{vd} = -\frac{1}{2} E_0 E_1^2 \quad (6)$$

пропорционален плотности потока мощности падающего излучения ($P_1 \simeq E_1^2$) и небольшой амплитуде подставки ($E_r = E_0 - 1/3E_0^3 \simeq E_0$). Полярности сигнала и подставки в принятой модели противоположны.

Если в падающем излучении есть небольшая по мощности составляющая на удвоенной частоте (2ω), т.е. $E_1^2 \gg E_2^2 \neq 0$, то вместо (6) наблюдается сумма двух сигналов

$$j_{vd} = -\frac{1}{2} E_0 E_1^2 - \frac{1}{4} E_1^2 E_2 \cos \phi, \quad (7)$$

причем дополнительная к (6) часть из (7) также пропорциональна P_1 , но может иметь любую полярность из-за зависимости от разности фаз между гармониками (ϕ). Эту дополнительную часть практически невозможно учесть при калибровке и ее следует отнести к сигналу ошибки, которая может достигать при $E_2 \geq 2E_0$ сравнимой с основным сигналом (6) величины. Так, например, в случае $\rho \approx 10 \Omega \cdot \text{см}$, $E_0 \approx 10 \text{ В/см}$, $P_2 \approx 1 \text{ Вт}$ амплитуда сигнала ошибки достигает 0.2 от основного сигнала, и если $P_1 \simeq 10^4$, то $P_2/P_1 \simeq 10^{-4}$.

Сигнал ошибки не зависит от E_0 , следовательно, существует и при отключении питания детектора ($E_0 = 0$). Это характерное свойство удобно использовать для определения величины ошибки измерения, а иногда и для восстановления амплитуды основного сигнала (6). В качестве иллюстрации на рис. 2 вместе с измеренными (при $E_0 \neq 0$) приведены и соответствующие сигналы ошибок (0), имеющие, согласно (7), меньшую длительность и разную полярность в зависимости от фазировки (ϕ). Фаза ϕ изменялась путем изменения длины приемного волноводного тракта, т.е. d_c . Увеличение d_c на 4 см изменяет фазу ϕ на π .

Дополнительный сигнал пропорционален полю второй гармоники, точнее ($\simeq E_2 \cos \phi$), которое может возбуждаться не только входным сигналом, но и вследствие протекания тока второй гармоники

$$j_{v2} \approx E_2 \left(1 - \frac{1}{2} E_1^2 \right) \cos(2\omega t + \phi) - \frac{1}{2} E_0 E_1^2 \cos 2\omega t \quad (8)$$

по внутренним (и внешним) цепям детектора, в частности по внутренней индуктивности (l). При этом форма сигнала ошибки становится зависящей от частотных свойств элементов, составляющих детектор на высоких частотах ($\approx 2\omega$), что, очевидно, может вносить дополнительные искажения в выходной сигнал (7).

Представляется уместным сделать дополнительные качественные пояснения. Вольт-амперная характеристика материала полупроводника антисимметрична. При подаче небольшого постоянного поля (E_0) рабочая точка смещается, с чем связано появление квадратичной нелинейности ($j_v \simeq \dots - E_0 E_v^2$), ответственной за возникновение эффекта детектирования, т.е. основного сигнала (6). При малом смещении ($E_0 \ll 1$) в характеристике (3) сохраняется большая кубическая нелинейность ($j_v \simeq \dots - 1/3 E_v^3$), на которой поле второй гармоники вместе с полем первой гармоники порождает сигнал ошибки. Поскольку кубическая нелинейность доминирует, то даже при небольшой величине поля второй гармоники ($E_0 \simeq E_2 \ll 1$) сигнал ошибки становится сравнимым с основным сигналом. Поле второй гармоники возникает и вследствие протекания тока второй гармоники по элементам схемы детектора. Эта составляющая тока порождается на небольшой квадратичной нелинейности полем первой гармоники, являющимся в рассматриваемом режиме наибольшим. Оба процесса влияют на форму выходного импульса и должны учитываться при решении обратной задачи детектора — восстановлении огибающей импульсов исследуемого высокочастотного излучения по выходному импульсу.

Заключение. Рассмотренные явления не являются уникальными. Они сопровождают работу любого из детекторов, использующих нелинейные вольт-амперные характеристики. Они известны как в теории колебаний, так и в теории резистивных СВЧ-датчиков [1]. Поэтому в статье преследовалась цель лишь обратить внимание на опасность возникновения больших ошибок при измерении параметров мощных СВЧ-импульсов малой длительности широко используемыми резистивными датчиками на горячих носителях. В типичных условиях проведения

экспериментов возможно завышение пиковой мощности и КПД в несколько раз.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 03–02–17297.

Список литературы

- [1] *Денис В., Паужа А., Пожела Ю.* и др. Резистивные датчики и преобразователи импульсных СВЧ сигналов (Электроника в полупроводниках, 2). Вильнюс: Моклас, 1980. С. 9–72.
- [2] *Белоусов В.И., Зеленцов В.И., Офицеров М.М.* и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. 1979. ИПФ АН СССР. С. 275–292.
- [3] *Климов А.И.* // ПТЭ. 1999. № 6. С. 86–88.
- [4] *Mindaugas Dagys, Zilvinas Kancleris, Rimas Simniskis et al.* // IEEE Antennas and Propagation Magazine. V. 43. N 5. October 2001. P. 64–78.