

Физическая аппаратура и ее элементная база

УДК 621.383

Применение прецизионных ВАХ для исследования ИК-фоторезисторов

Часть I. Разработка метода прецизионных ВАХ

Л. И. Дьяконов, В. В. Пробыллов

Федеральное государственное унитарное предприятие "Альфа", Москва, Россия

Предложен простой метод получения прецизионных вольт-амперных характеристик (ВАХ), удобный для исследований свойств ИК-фоторезисторов (ФР). Метод позволяет в ручном режиме быстро получать таблицу $I = f(V)$ из более чем 40 дискретных значений с точностью до 0,01 %. Таблица ВАХ обрабатывается в ПК в целях коррекции данных, получения зависимости $R = f(V)$ и вычисления рассеиваемой мощности. График $R = f(V)$ более удобен, чем сама ВАХ, для наблюдения свойств ФР при старении, термообработках, изменениях технологии изготовления и т. п.

Принято считать, что ФР, в том числе изготавливаемые из $Cd_xHg_{x-1}Te$ (КРТ) для диапазона 8–12 мкм, являются чисто омическими сопротивлениями и обладают линейной ВАХ. Это верно лишь в первом, самом грубом, приближении.

Реальный ФР заметно отличается от чисто омического, поскольку подвижность носителей зависит от величины приложенного поля [1], а на контактах иногда наблюдаются эффекты аккумуляции носителей [2, 3]. Наконец, погрешности технологии изготовления могут привести к неомическому поведению контактов. Отклонения от омичности заметны тем лучше, чем больше точность измерения ВАХ и чем больше возможность обработки получаемой из ВАХ информации. Ниже приведена методика прецизионного измерения ВАХ и показано ее применение для исследования свойств ФР длинноволнового ИК-диапазона из КРТ.

Метод измерения ВАХ ФР

Схема измерения ВАХ показана на рис. 1. Напряжение от аккумуляторной батареи АВ большой емкости подается последовательно на ограничивающее сопротивление R_{23} , реостат со ступенчатым переключателем ПС и измеряемый ФР. Напряжение, падающее на ФР, измеряется цифровым вольтметром. Переключатель П1 позволяет изменять полярность поданного на ФР напряжения, а с помощью переключателя П2 измеряется напряжение батареи V_{AB} , В.

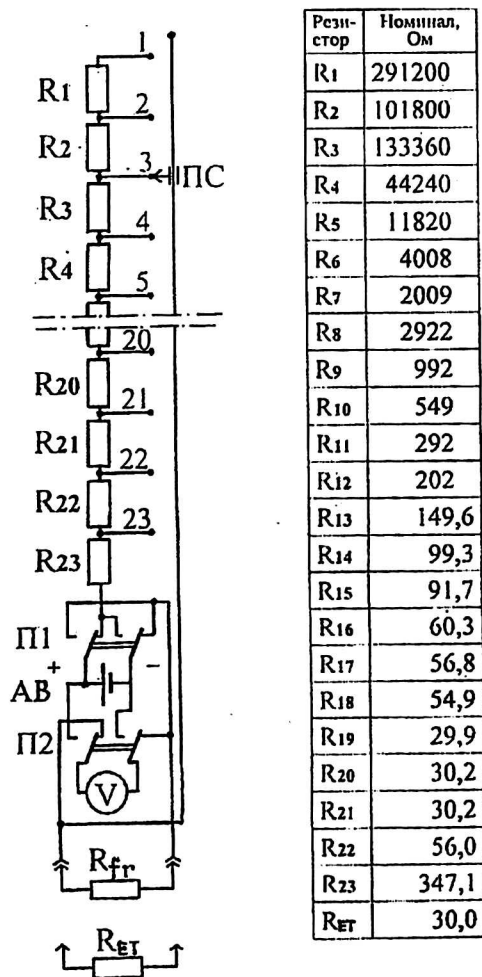


Рис. 1. Схема измерения ВАХ

В переключателе ПС задействованы 23 позиции. Напряжение, подаваемое на ФР и измеряемое вольтметром, ступенчато изменяется от минимума до максимума, когда ползунок переключателя проходит от 1-й до 23-й позиции, соответственно. Ток I_k (мА), протекающий через ФР, для каждой k -й позиции переключателя не измеряется, а рассчитывается по формуле

$$I_k = 1000 (V_{AB} - V_k) / Rn_k, \quad (1)$$

где V_k — напряжение на ФР в k -й позиции переключателя, В;

Rn_k — нагрузочное сопротивление в k -й позиции переключателя, Ом.

Нагрузочное сопротивление равно сумме сопротивлений от 23-го до k -го

$$Rn_k = R_{23} + R_{22} + R_{21} + \dots + R_k. \quad (2)$$

Сопротивление и рассеиваемая ФР мощность для k -й позиции рассчитываются по формулам (3) и (4), соответственно

$$R_k = V_k / I_k; \quad (3)$$

$$N_k = V_k I_k. \quad (4)$$

Оформленные результаты измерений представлены в таблице, где в колонках последовательно записаны номер позиции k , соответствующее ей нагрузочное сопротивление Rn_k , показание вольтметра V_k , рассчитанные значения тока I_k , сопротивление R_k и рассеиваемая мощность N_k . При необходимости можно ввести поправку на дрейф нуля вольтметра.

ПРИМЕР ИЗМЕРЕНИЙ ВАХ ФР ИЗ ОБЪЕМНОГО КРТ
 ПРИБОР ПГ1033405Г; ФР 18; T = 77 К; $V_{AB} = 11,33$ В (28.04.99)

Позиция k	Rn_k , Ом	V_k , В	I_k , мА	R_k , Ом	N_k , мВт
23	347,1	-1,154	-29,317	39,4	33,835
22	403,1	-1,107	-25,361	43,7	28,077
21	433,3	-1,037	-23,754	43,7	24,636
20	463,5	-0,945	-22,405	42,2	21,176
19	493,4	-0,857	-21,226	40,4	18,193
18	548,3	-0,724	-19,343	37,4	14,007
—	—	—	—	—	—
10	2049	-0,153	-5,454	28,1	0,835
9	3041	-0,1018	-3,692	27,6	0,376
8	5963	-0,0513	-1,891	27,2	0,097
7	7972	-0,0383	-1,416	27,1	0,054
6	11980	-0,0255	-0,944	27,0	0,024
5	23800	-0,0129	-0,476	27,2	0,006
—	—	—	—	—	—

Окончание таблицы

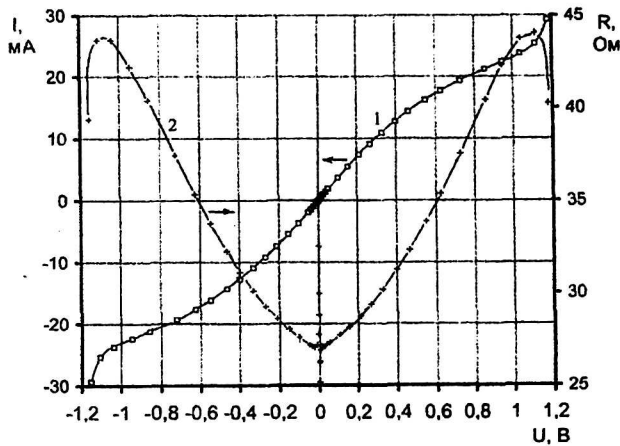
Позиция k	Rn_k , Ом	V_k , В	I_k , мА	R_k , Ом	N_k , мВт
5	23800	0,0129	0,476	27,1	0,006
6	11980	0,0256	0,944	27,1	0,024
7	7972	0,0386	1,416	27,2	0,055
8	5963	0,0517	1,891	27,3	0,098
9	3041	0,1024	3,692	27,7	0,378
10	2049	0,154	5,455	28,2	0,838
—	—	—	—	—	—
18	548,3	0,726	19,340	37,5	14,039
19	493,4	0,858	21,224	40,4	18,208
20	463,5	0,947	22,402	42,3	21,212
21	433,3	1,039	23,750	43,7	24,674
22	403,1	1,116	25,339	44,0	28,275
23	347,1	1,177	29,251	40,2	34,425

Сопротивления, использованные в схеме, подобраны таким образом, чтобы снимать характеристики ФР, изготовленных из объемного $Cd_xHg_{1-x}Te$ или КРТ, полученного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) при $x = 0,2$ с размером в плане 50×50 мкм² и толщиной от 5 до 20 мкм. Темновое сопротивление таких ФР обычно 10—100 Ом. При напряжении батареи 12 В максимальное напряжение на ФР не превышает 1,5 В, а ток — 30 мА, что оказалось вполне безопасным для всех исследованных ФР.

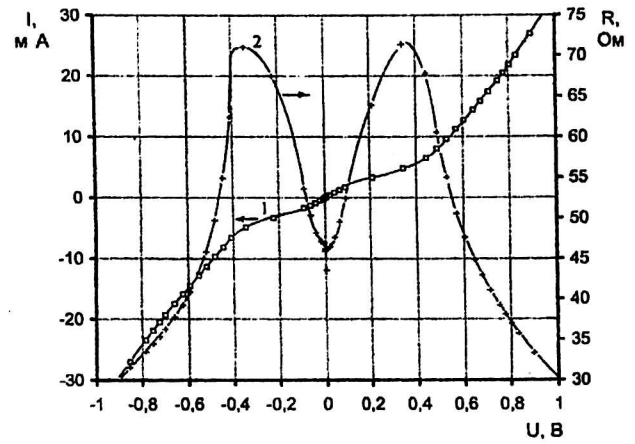
Для проверки метода вместо ФР подключили близкий по номиналу резистор общего назначения R_{ET} . Его ВАХ оказалась строго линейной, а график $R = f(V)$ — параллелен оси абсцисс. Иначе обстоит дело с ФР, сделанным по общепринятой технологии из объемного КРТ.

На рис. 2, а показаны ВАХ и график $R = f(V)$ такого ФР длинноволнового ИК-диапазона, взятые из таблицы. ВАХ при небольших напряжениях субъективно воспринимается как чисто линейная. Более информативна кривая $R = f(V)$. Уже при незначительном увеличении напряжения сопротивление возрастает, затем достигает максимума и начинает быстро падать.

Такой же в принципе вид имеют ВАХ и кривые $R = f(V)$ ФР, изготовленного из КРТ, полученного методом МЛЭ [4]. Как видно из рис. 2, б, примерно линейный участок ВАХ наблюдается в более узком диапазоне напряжений, а кривая $R = f(V)$ имеет характерный М-образный вид.



a



б

Рис. 2. ВАХ (1) и график $R = f(V)$ (2) для ФР:
а — из объемного КРТ; б — из КРТ, изготовленного МЛЭ

Нелинейность ВАХ приводит к тому, что измеренное темновое сопротивление ФР зависит от измерительного тока (напряжения). Если измерять его (как обычно делают) на постоянном токе 1 и 10 мА, то разница может составлять несколько процентов для ФР из объемного материала и достигать десятков процентов для ФР, изготовленного из материала, полученного МЛЭ.

Для ФР из объемного КРТ вид ВАХ и $R = f(V)$ можно было бы объяснить омическим разогревом. На рис. 3 (кривая 1) показана типичная зависимость сопротивления такого ФР от температуры. При нагреве от 77 К оно сначала быстро растет, достигает максимума примерно при 135 К, затем постепенно уменьшается. Рост сопротивления вблизи азотной температуры связан со снижением подвижности электронов в примесном КРТ при практически неизменной их концентрации. Нагрев выше 100 К вызывает быстрое увеличение концентрации электронов, компенсирующее снижение подвижности. Рост сопротивления замедляется и достигает максимума. Еще более сильный нагрев снижает сопротивление за счет дальнейшего увеличения концентрации электронов в той области температур, где материал ведет себя как собственный.

Если принять, что единственной причиной нелинейности ВАХ ФР является омический разогрев ФР, то можно рассчитать кривую $R = f(V)$ (см. рис. 2, а), варьируя один-единственный параметр — нагрев ФР на единицу рассеиваемой мощности $\Delta T/\Delta N$. Допуская, что повышение температуры площадки пропорционально мощности, можно получить хорошее совпадение с экспериментом при разумных значениях $\Delta T/\Delta N$ порядка единиц К/мВт.

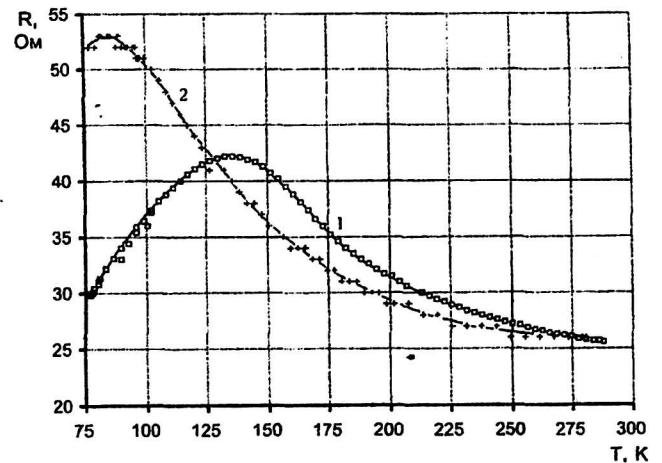


Рис. 3. Типичная зависимость сопротивления от температуры для ФР:
1 — из объемного КРТ; 2 — из КРТ, изготовленного МЛЭ

ВАХ, снятые при 300 К, похожи для всех исследованных ФР. Зависимость $R = f(V)$ имеет вид симметричной параболы с опускающимися ветвями, так как КРТ в этих условиях является собственным, и нагрев всегда вызывает снижение сопротивления. Используя ту же методику расчета, можно неплохо воспроизвести кривую $R = f(V)$ при ином, хотя и близком значении $\Delta T/\Delta N$.

Оказалось, однако, что только омическим разогревом вид ВАХ и кривых $R = f(V)$ объяснить невозможно.

Так, ВАХ и $R = f(V)$ ФР из объемного КРТ измеряли при 145 К, т. е. в области максимума температурной зависимости сопротивления. Следовательно, нагрев ФР вблизи этой температуры может только снижать сопротивление. Тем не менее, при увеличении напряжения от нуля по-прежнему наблюдали увеличение сопротивления, как и на рис. 2, а, кривая 2.

ФР, изготовленный методом МЛЭ, имеет максимум температурной зависимости сопротивления как раз вблизи 77 К (см. рис. 3, кривая 2). Однако на кривой $R = f(V)$, снятой при 77 К, мы вновь видим (см. рис. 2, б) очень резкий подъем сопротивления при увеличении напряжения от нуля.

Сведения, противоречащие объяснению формы ВАХ только омическим разогревом, можно найти в работе [3]. Авторы измеряли ВАХ в импульсном режиме, исключая омический разогрев. ФР изготовлены из объемного КРТ и имели очень близкие к нашим характеристики. ВАХ представлена в виде осциллограммы с указанием масштабов по обеим осям. Тщательно перестроив ее в координатах $R = f(V)$, мы получили хорошее качественное и количественное совпадение с кривой 2 на рис. 2, а. Поскольку нагрев ФР исключен, авторы считают причиной повышения темнового сопротивления снижение подвижности электронов с ростом напряженности электрического поля.

Чтобы окончательно выяснить роль омического нагрева в формировании ВАХ, измерения в импульсном режиме следует выполнять с варьируемой скважностью подаваемого импульса напряжения.

Прецизионно измеренные ВАХ могут быть использованы и для оценки фоточувствительных параметров ФР. Обратимся к двум кривым $R = f(V)$ ФР, изготовленного из объемного КРТ, снятым в абсолютной темноте и при подаче на него фонового излучения (рис. 4). Фоновое излучение заметно уменьшает сопротивление ФР, особенно при малых напряжениях. На рис. 5 (кривая 1) показана зависимость снижения сопротивления ΔR от напряжения, полученная вычитанием нижней кривой из верхней на рис. 4. Если считать фоновое излучение своеобразным ИК-сигналом (с нулевой частотой модуляции), то соответствующий ему ответный сигнал ФР равен $\Delta R V/R$ В.

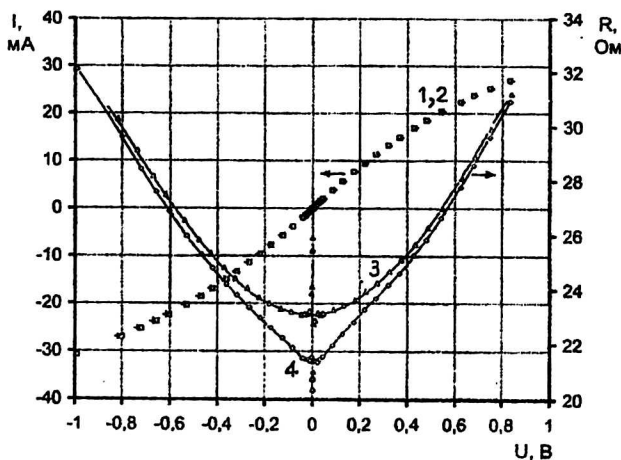


Рис. 4. ВАХ (1 и 2) и графики $R = f(V)$ ФР из объемного КРТ без фонового излучения (3) и с фоном (4)

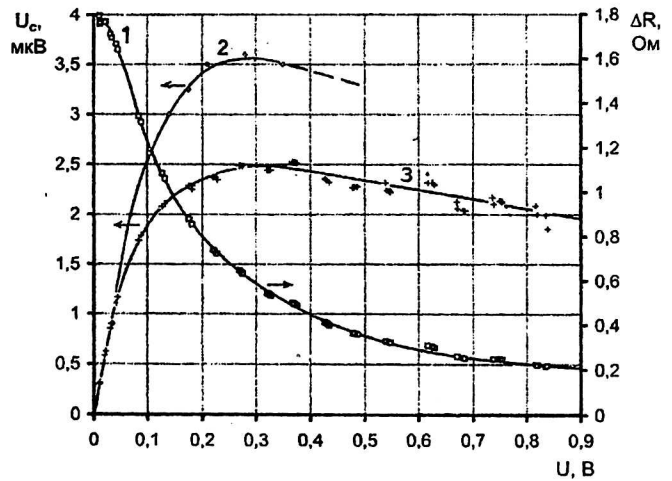


Рис. 5. Зависимости от V для ФР из объемного КРТ: 1 — ΔR ; 2 — напряжения сигнала, измеренного при 1200 Гц; 3 — напряжения сигнала, вычисленного по ΔR

Можно сравнить его с сигналом того же самого ФР, когда он облучается при измерениях потоком $2,52 \cdot 10^{14}$ квант/(см²·с) с частотой модуляции 1200 Гц (см. рис. 5, кривая 2). Фоновый поток для абсолютно черного тела (АЧТ) при 300 К и телесном угле 2π равен $7,39 \cdot 10^{17}$ квант/(см²·с), т. е. в 2935 раз больше. Кривая 3 на рис. 5 показывает зависимость от напряжения "фонового" сигнала $\Delta R V/R$, поделенного на упомянутый коэффициент. Она проходит несколько ниже кривой 2, вполне совпадая с ней по характеру. Кривые 2 и 3 практически сливаются, если взять коэффициент 2075 вместо 2935. Такое соответствие можно признать вполне удовлетворительным, поскольку излучение от окружающей среды (фоновое излучение) всегда меньше, чем от моделирующего ее АЧТ. Точно так же реальный телесный угол должен быть меньше, чем 2π . Следовательно, коэффициент 2935 есть предельно большое расчетное значение, а реальное может быть только меньше, как и оказалось в приведенном примере.

Применение прецизионных ВАХ

Обычно кривые $R = f(V)$ образцов ФР из объемного КРТ и КРТ, изготовленного МЛЭ, симметричны относительно полярности приложенного напряжения и имеют вид, аналогичный приведенным на рис. 2, а и б, соответственно. Однако среди тех и других могут встретиться зависимости $R = f(V)$ аномального вида с резко нарушенной симметрией относительно полярности приложенного напряжения. В таких случаях можно предполагать ухудшение качества, по крайней мере, одного из двух контактов. Соот-

ветственно ухудшаются характеристики ФР. Приходилось наблюдать "вывернутые" кривые $R = f(V)$, когда при нулевом напряжении вместо минимума появляется более или менее выраженный максимум. Как будет показано в следующей публикации, причиной могут быть процессы термической деградации ФР, развитие которых как раз и удобно наблюдать методом прецизионных ВАХ.

Выше продемонстрирована принципиальная возможность измерения вольтовой чувствительности с помощью прецизионных ВАХ. Этот метод вполне может найти практическое применение, если заменить механический переключатель электронным, повысить точность измерений и автоматизировать обработку данных на ЭВМ.

Литература

1. Yoo S. D., Jo N. H., Ko B. G., Rho J. S., Lee S. D., Kwack K. D. Electron mobility modeling in HgCdTe// Proc. SPIE. 1998. V. 3436. P. 41—49.
2. Arch D. K., Wood R. A., Smith D. L. High responsivity HgCdTe heterojunction photoconductor// J. Appl. Phys. September 1985. V. 58. № 6. P. 2360—2370.
3. Shacam-Diamond Y. J., Kidron I. Contact and bulk effects in intrinsic photoconductive infrared detectors// Infrared Physics. 1981. V. 21. P. 105—115.
4. Сусов Е. В., Сидоров Ю. Г., Северцев В. Н., Комов А. А., Чеканова Г. В., Дворецкий С. А., Варавин В. С., Михайлов Н. Н., Дьяконов Л. И. Многоэлементный охлаждаемый фоторезистор на основе гетероэпитаксиальных структур HgCdTe// Автометрия. 1996. № 4. С. 40—44.
5. Северцев В. Н., Сусов Е. В., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Чеканова Г. В. 128-элементный охлаждаемый фотоприемник на основе гетероэпитаксиальных структур CdHgTe// Там же. 1998. № 4. С. 21—26.

Application of I—V precise graphs for IR-photoconductors characterization

Part I. The development of the method of I—V graphs precise measurements

L. I. Diakonov, V. V. Probylov

The Federal State United Enterprise "Alpha", Moscow, Russia

The simple and precise method of I—V curve measurement is developed. The method suit for IR-photoconductors (IRPC) characterization. It allows to obtain quickly the I—V table with the accuracy up to 0.01 % from more than 40 separate values. The data of the table are treated in a PC for: (a) data correction, (b) deriving $R = f(V)$ dependence and (c) calculation of power dissipated by photoconductor. The $R = f(V)$ graphs fit better then I—V dependences for the characterization of IRPC properties on ageing, after heat treatment and on manufacturing technology changes.