УДК 621.383

Особенности измерения шумовых характеристик фоточувствительных структур с квантовыми ямами

А. И. Хатунцев, В. П. Котов
ГУП НПП "Пульсар", Москва, Россия

И. В. Будкин
АО "Сигм-Плюс", Москва, Россия

Измерения экспериментальных тест-образцов фоточувствительных структур с квантовыми ямами, специально изготовленных с различными отклонениями в структуре и технологической обработке, показали наличие большого разброса их электрофизических параметров. На предварительных стадиях статистических исследований тест-структур можно рекомендовать контроль уровня шума при температуре жидкого азота.

На стадии разработки твердотельных полупроводниковых устройств существует необходимость в исследовании свойств используемых материалов и применяемых технологических обработок, в частности шумовых характеристик сформированных структур. В публикациях, посвященных измерению низкотемпературных характеристик структур с квантовыми ямами

© Хатунцев А. И., Котов В. П., Будкин И. В., 2003

(СКЯ) [1], обычно не обсуждаются конкретные технические решения обеспечения температурного режима и вывода измеряемого сигнала из холодной зоны, имея в виду, по-видимому, что они принципиально не отличаются от уже применявшихся ранее способов [2].

Опробованные нами варианты использования криогенных машин на основе термодинамических циклов Стирлинга и Джиффорда—Мак-Магона имеют большой уровень электромагнитных и вибрационных помех, в сотни раз превышающий измеряемые величины.

К сожалению, применение высокопроизводительных проточных криостатов [3] на данном этапе исследований незащищенных от внешних воздействий кристаллов не представляется возможным хотя бы уже потому, что принудительный обдув струей газа с заданной температурой возбуждает в полупроводниковой структуре интенсивный шум из-за флуктуаций на поверхностных состояниях.

обследуемого кристалла от времени, представленная на рис. 1, *а*, свидетельствует о наличии слабых флуктуаций, не превышающих 0,1 К в течение длительного времени (начало отсчета времени приходится на момент заливки в криостат жидкого азота). На рис. 1, *б* представлена временная зависимость температуры кристалла после окончания процесса охлаждения в режиме естественного прогрева криостата. Максимальная скорость изменения температуры составляет около 1 °С/мин, что вполне приемлемо для оперативного контроля шумов в области низких и средних частот.

Однако достигнутая хорошая теплоизоляция охлаждаемого объема сопровождается существенным ухудшением высокочастотных свойств устройства считывания, поскольку увеличивает паразитную емкость в его входной цепи. Положение осложняется высокоомностью СКЯ при рабочих температурах (рис. 2), вследствие чего верхняя частота измерительного канала может снижаться до единиц килогерц и ниже.

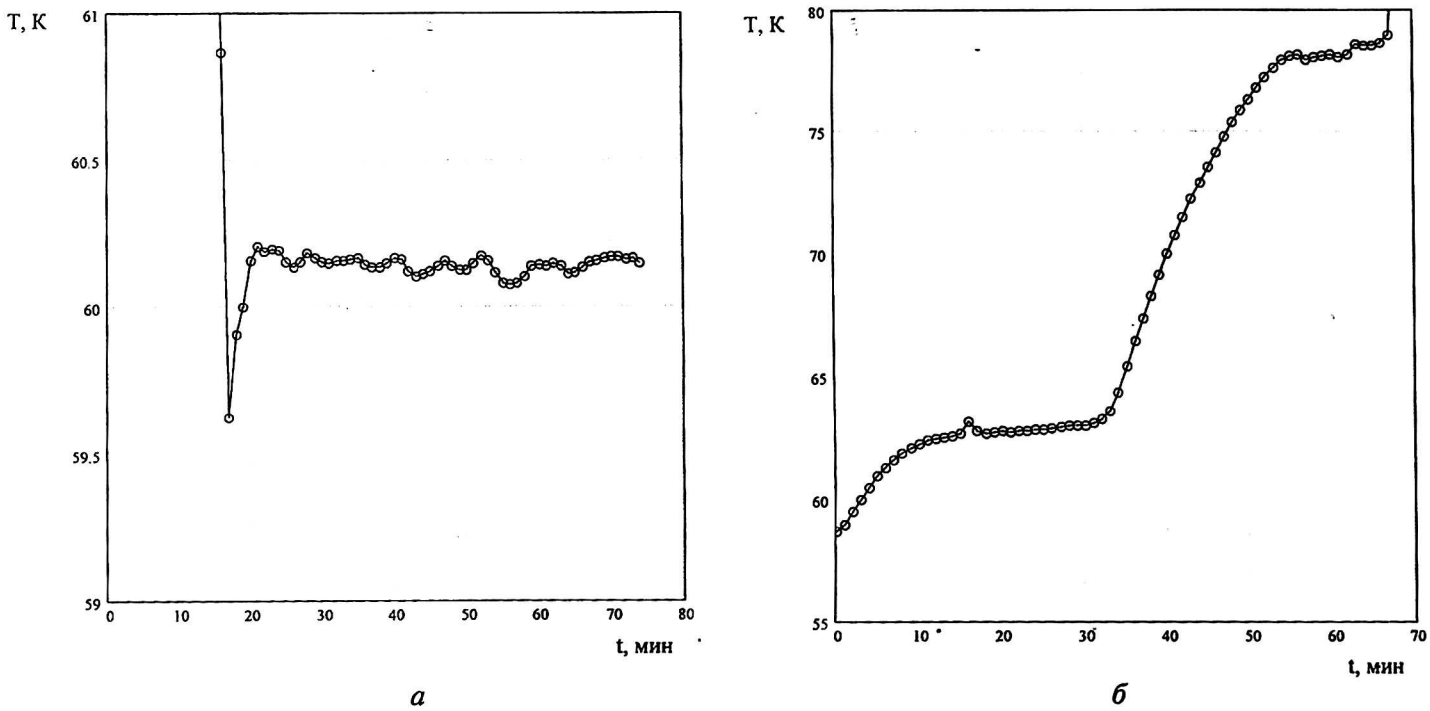

Рис. 1 Экспериментальная зависимость температуры тест-структуры от времени:
а — при поддержании постоянного теплового режима кристалла; *б* — в режиме естественного прогрева криостата

К настоящему времени наилучшие результаты при наименьших затратах были нами получены при использовании так называемых откачных криостатов, в которых под действием создаваемого разряжения жидкий азот ($T_{кип}$ = 77 К) охлаждается до температуры замерзания ($T_{пл}$ = 63 К при нормальном давлении) и ниже. В режиме поддержания температуры на фиксированном уровне измеренная зависимость температуры

Радикальным вариантом повышения быстродействия является применение считывающих измерительных устройств с низкоомным входом [4]. Достаточно подробно измерения шумовых свойств высокоомных источников сигнала при работе на емкостную нагрузку (в данном случае — на большую паразитную емкость) были описаны в работе [5].

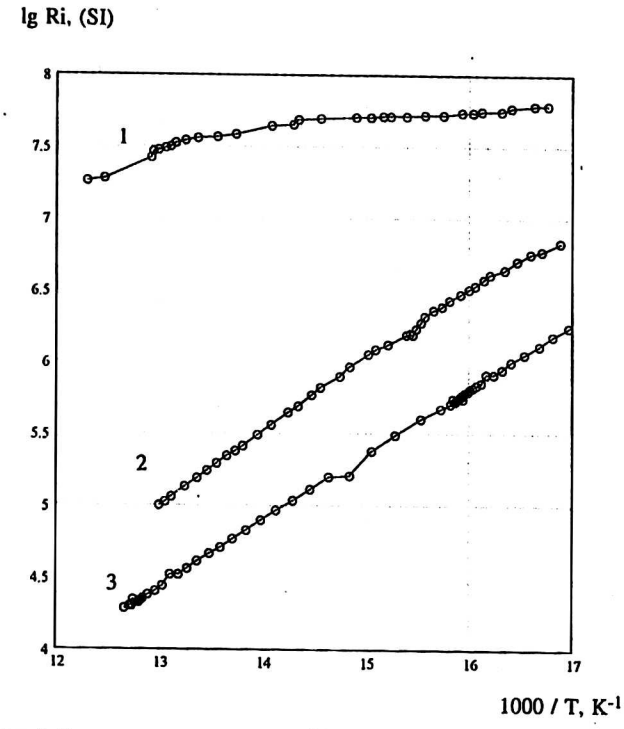

Рис. 2. Темновое сопротивление Ri различающихся по технологии изготовления тест-образцов 1, 2 и 3 в интервале температур при напряжениях 0,5; 1 и 0,1 В, соответственно

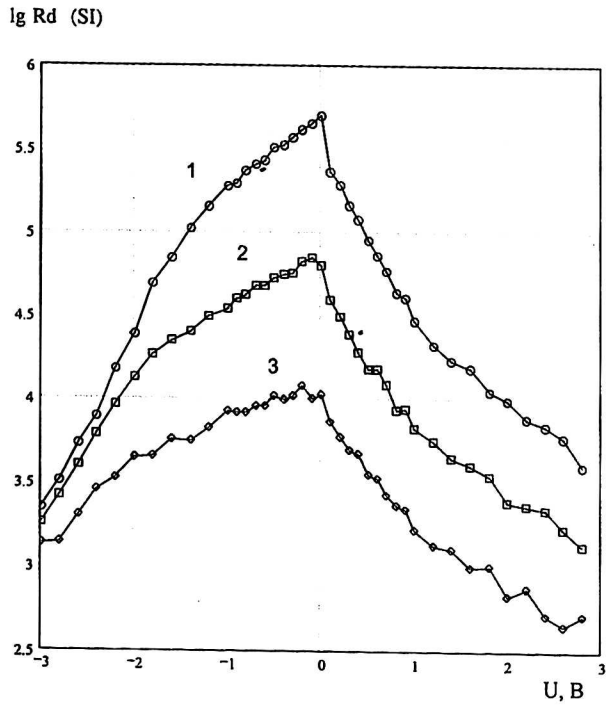

Рис. 3. Зависимость величины динамического сопротивления тест-структуры от смещения при различных температурах: 1 — 60 K; 2 — 68 K; 3 — 78 K

Реально в качестве первого каскада макетного измерительного устройства использовался операционный усилитель К544УД1А (по электрическим параметрам близкий к мкAF 771) с параллельно-параллельной отрицательной обратной связью, обеспечивающей входное сопротивление около 10 кОм. Это позволило реализовать уверенный вывод сигнала СКЯ при уровне собственной спектральной плотности шумов измерителя около $5 \cdot 10^{-14}$ А/Гц$^{1/2}$ на частоте 1 кГц в полосе 210 Гц. Из различных вариантов управления электрическим режимом выбран традиционный способ с резистивной нагрузкой [6] в интервале единиц — десятков мегаом. Для более высокоомных нагрузок предусмотрена методика контроля, исключающая влияние неравномерности частотной характеристики в области высоких частот.

Динамическое сопротивление $Rd = dU/dI$ при подаче значительных по величине смещений на СКЯ, естественно, заметно меньше приведенного выше $Ri = U/I$ и в первом приближении составляет десятки — сотни килоом (рис. 3). Именно это обстоятельство в значительной степени способствовало выбору указанного выше входного сопротивления измерительного устройства в целях повышения эффективности вывода шумового сигнала (режим согласования по мощности).

Ниже приведены некоторые результаты обследования шумового тока трех тест-образцов СКЯ с эффективным размером около 0,4×0,4 мм на $A^{III}B^{V}$, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии [7] (заметим, что приведенные на рис. 2 и 3 результаты относятся к образцам этой же разновидности).

Представленные на рис. 4 экспериментально измеренные температурные зависимости шумового тока (кривые 1, 2 и 3) сопоставлены с собственным шумом измерительной системы (позиция 4). Во всем обследованном температурном диапазоне собственными шумами измерителя можно пренебречь по сравнению с реальным шумом СКЯ.

Сравнить величину реального шума с его теоретической величиной $i_n^2 = g \cdot 4qI$ [8] можно путем вычисления экспериментального коэффициента g (здесь q — заряд электрона, I — ток СКЯ). Найденные зависимости от температуры (рис. 5) заставляют с осторожностью отнестись к трактовке g как коэффициента усиления фототока [1]. Скорее всего, доминирует низкочастотный шум, возбуждаемый на глубоких шумовых центрах.

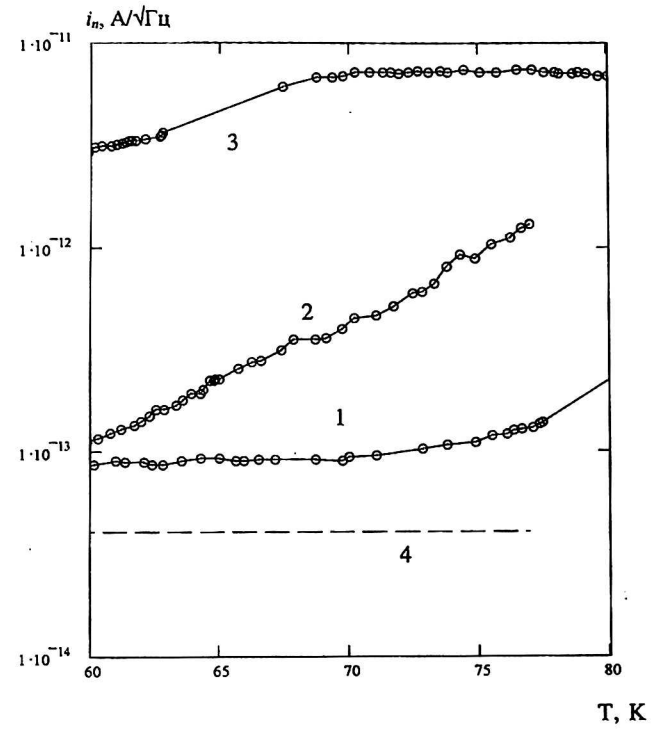

Рис. 4. Спектральная плотность шумового тока в функции температуры: измеренный шум СКЯ для образцов 1, 2 и 3 и собственный шум 4 измерительной системы

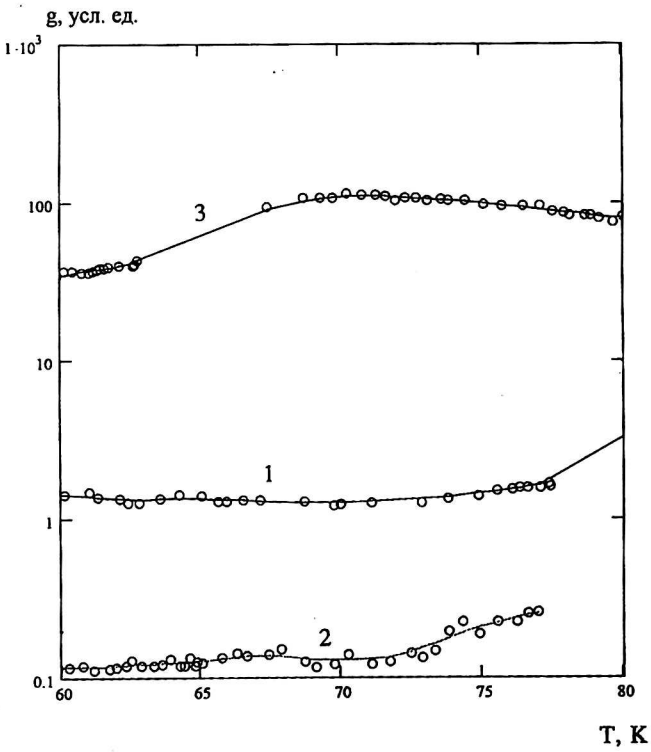

Рис. 5. Температурная зависимость коэффициента g для образцов 1, 2 и 3

Учет результатов измерения температурной зависимости тока (рис. 6) позволяет сделать следующие предварительные замечания относительно результатов измерения и вычисления параметров образцов (см. таблицу):

параметры образца 1 близки к ожидаемым: темновой ток достаточно мал, шум примерно соответствует $i_n^2 = g{\cdot}4qI$;

токи образцов 2 и 3 на два-три порядка превышают ток образца 1, причем имеют различную температурную зависимость;

шум образца 2 существенно ниже, чем можно было бы ожидать из соотношения $i_n^2 = g{\cdot}4qI$, хотя, тем не менее, $i_n^2 \sim I$;

шум образца 3, по-видимому, слабо связан с его током, и вызван, вероятнее всего, большой концентрацией дефектов. При построении графиков в линейном масштабе шумового тока достаточно хорошо просматривается максимум при $T \sim 70$ K, что могло бы свидетельствовать о наличии локализованных шумовых уровней. Этот источник шума удобно представлять в виде источника шумового напряжения, включенного в цепь последовательно;

тепловыми шумами образцов с разумными значениями темновых токов можно пренебречь.

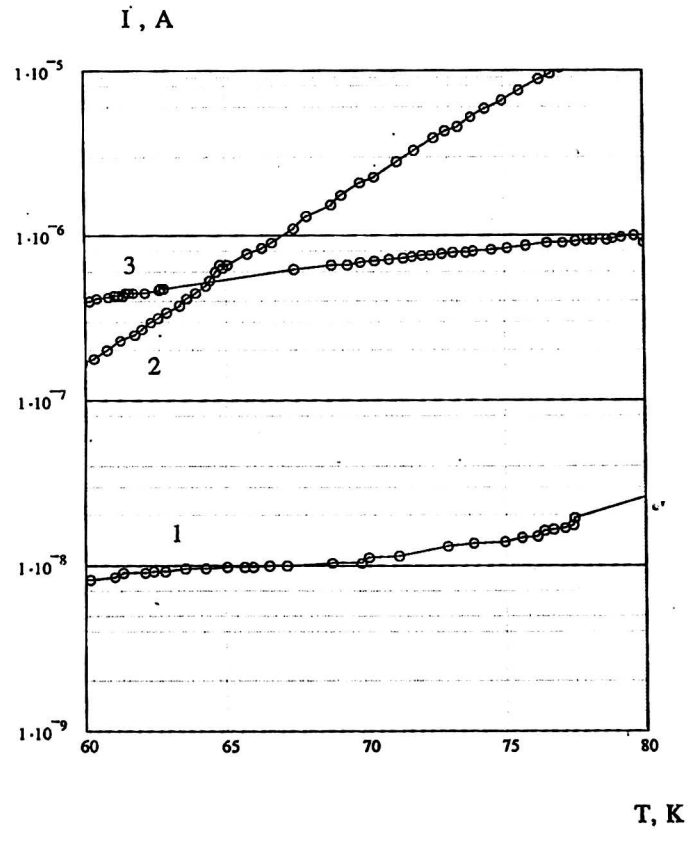

Рис. 6. Температурная зависимость тока образцов СКЯ

Номер образца	Параметры для T~77 К				
	измерено			вычислено	
	U, В	I, мкА	i_n, пА/$\sqrt{\text{Гц}}$	$\sqrt{(4qI)}$, пА/$\sqrt{\text{Гц}}$	$\sqrt{(4kT/Rd)}$, пА/$\sqrt{\text{Гц}}$
1	0,5	0,02	0,12	0,11	0,014
2	1	20	1,2	3,6	0,063
3	1	1	8	0,8	0,36

Заключение

Разработанный макет устройства для измерения низкочастотных шумов структур с квантовыми ямами при низких температурах позволяет проводить оперативный контроль экспериментальных тест-структур в лабораторных условиях. Затруднения вывода сигнала, вызванные удаленностью находящихся в холодной зоне измеряемых тест-структур от расположенного вне охлаждаемой камеры измерителя, преодолены благодаря обеспечению режима, близкого к согласованию по мощности между контролируемой структурой и входной цепью измерительного устройства.

Измерения экспериментальных тест-образцов, специально изготовленных с различными отклонениями в структуре и технологической обработке, показали наличие большого разброса их электрофизических параметров. На предварительных стадиях статистических исследований тест-структур можно рекомендовать контроль уровня шума при температуре жидкого азота.

Выражаем искреннюю благодарность Н. С. Мостовлянскому за разностороннее обсуждение метрологических вопросов и практическую помощь в программировании и Л. М. Василевской — за активное участие в обсуждении электрофизических параметров и участие в изготовлении экспериментальных структур.

Литература

1. *Wang D. C., Bosman G., Wang Y. H., Li S. S.* Noise performance of bound-to-miniband transition III-V quantum-well infrared photodetectors// J. Appl. Phys. 77 (3). 1 February 1995. P. 1107—1112.

2. *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. — М.: Мир, 1988. С. 357 (G. Gaussorgues, La Thermographie Infrarouge. Principes-Technologie-Applications, Technique et Documentation Lavoisier, Paris).

3. *Беляева А. И., Силаев В. И., Стеценко Ю. Е.* Проточные криостаты для лабораторных исследований. — Киев: Наукова думка, 1987.

4. *Курбатов Л. Н.* Оптоэлектроника видимого и инфракрасного диапазонов спектра. — М.: Изд-во МФТИ, 1999. С. 132.

5. *Фролов В. А., Хатунцев А. И.* Вывод сигнала из приборов с переносом заряда при работе на емкостную нагрузку// Электронная техника. 1988. Сер. 2. Вып. 1 (192). С. 37—43.

6. *Хатунцев А. И.* Шумовые характеристики усилителей при различных способах управления полевым транзистором// Там же. 1986. Вып. 5 (184). С. 65—73.

7. *Залевский И. Д., Булаев П. В., Мармалюк А. А., Падалица А. А., Куликов В. Б., Кригель В. Г.* Выращивание кванторазмерных структур AlGaAs/GaAs для фотоприемников//Известия вузов. Материалы электронной техники, 1999. № 3. С. 8—11.

8. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов, ч. 2: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. С. 342. (S.M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, v. 2, New Jersey, 1981).

Features of measurement of noise performances for quantum well structures

A. I. Khatuntsev, V. P. Kotov
PULSAR Scientific & Production Enterprise, Moscow, Russia

I. V. Budkin
SIGM-PLUS, Inc., Moscow, Russia

Measurements of experimental test-models of quantum well photosensing structures, purpose-made with different diversions in structure and technological handling, have shown presence of a wide scatter of their physical properties. At preliminary stages of statistical examinations of test-structures it is possible to recommend a noise monitoring at the temperature of liquid azote.