

УДК 621.384

Применение шумовой спектроскопии для прогнозирования надежности приемников ИК-излучения на основе антимонида индия

И. Н. Мирошникова, А. М. Гуляев, Д. А. Недоруба
Московский энергетический институт, Москва, Россия

Разработана и изготовлена оригинальная установка и создано соответствующее математическое обеспечение, позволяющие оценить качество имеющейся или вновь разрабатываемой технологии производства приемников ИК-излучения на основе антимонида индия.

В настоящее время для фотоприемников (ФП) из InSb достижение режима ОФ при апертуре $2\beta = 60^\circ$ и $T_f = 290$ К, особенно для мало-размерных фоточувствительных элементов (ФЧЭ), не является научной проблемой.

Однако в условиях "нестационарного" производства и малого объема выпуска ФП необходимо учитывать, что стоимость и трудоемкость ФЧЭ составляет малую часть от стоимости и трудоемкости современного многоэлементного ФП.

В этих условиях прогнозирование качества ФП имеет особое значение, так как многие методы и оценки, используемые ранее в серийном производстве, сейчас вообще неприменимы.

Анализ отказавших и прогнозирование потенциально ненадежных ФЧЭ глубоко охлаж-

даемых ФП из InSb — одна из основных задач разработчиков и изготовителей этих изделий.

ФП из InSb — фоторезисторы и фотодиоды (ФПУ), как и 10 лет назад, — основа оптико-электронных изделий известного класса (ТГС, тепlopеленгаторов, отчасти ТВ).

На стадии производства, испытаний и анализа отдельных ФЧЭ многоэлементных ФП или отдельных одноэлементных фотоприемников в составе предъявляемых партий начиная с 60-х гг. использовался анализ вольтамперных характеристик (ВАХ). Обычно для этого использовался характеристикограф ПНХТ. Позже, к 90-м гг., для анализа ФЧЭ ФД проводился контроль вольтшумовых характеристик (ВШХ) в аппаратуре, усилительный тракт которой имел сравнительно узкую полосу пропускания — 20 % от f_0 при $f_0 \approx 1$ КГц.

Контроль ВАХ позволял исключить на стадиях производства ФЧЭ с катастрофическими отказами. Контроль ВШХ существенно повысил информационные возможности прогнозирования будущих катастрофических отказов и, несомненно, перспективен в производстве ФП.

Сложнее обстоит дело с анализом ФЧЭ из ФП, отказавших, т. е. ушедших за пределы норм ТУ, в процессе испытаний и длительного хранения ФП.

Если ограничиться рассмотрением только самого узла ФЧЭ, то наибольшую сложность для анализа представляют те, у которых изменение основного параметра (Φ_p или D^*), а точнее тока или напряжения шума, в рабочем режиме превышает 30–50 % от паспортных данных. По нашим представлениям, увеличение Φ_p связано с изменением частотных характеристик шума этих ФЧЭ.

Частотная характеристика шума ФП обычно не является паспортным параметром. При разработке технологий и новых образцов разработки в общем приводят недостаточные сведения об этих характеристиках, не оговаривая ни их возможных изменений при изменении фоновой обстановки, ни точности, с которой эти характеристики указываются. В известной степени это связано с длительностью подобных измерений и с тем, что у потребителей ФП обычно использовались усилительные тракты с $f_n > (200-500)$ Гц.

В МЭИ (ТУ) на кафедре полупроводниковой электроники разработан измерительный комплекс на базе ПК типа IBM, который позволяет исследовать спектры плотности мощности шума (СПМШ) полупроводниковых приборов и структур при различных температурах структуры и фона [1, 2].

Структурная схема измерительной установки для исследования СПМШ представлена на рис. 1.

Измерительная система включает в свой состав нановольтметр Unipan-273, работающий в широкополосном режиме 0,3–3·10⁵ Гц, с предусилителем (входное сопротивление 100 МОм, входная емкость 2 пФ) и широкополосный усилитель У7-1, имеющий встроенный фильтр нижних частот с дискретно изменяющейся частотой среза 10, 10², 10³, 10⁴ и 10⁵ Гц.

Усиленный и отфильтрованный шумовой сигнал поступает на один из входов специальной платы, совместимой с системной шиной ПЭВМ IBM, содержащей 12-разрядный АЦП последовательного приближения с временем преобразования 4 мкс. Полоса пропускания усилителя платы 0–250 кГц.

Процесс измерения заключается в последовательной регистрации и запоминании 2^N шумовых сигналов через интервал времени между отсчетами T. Спектр плотности мощности шума определяется с помощью дискретно-временного ряда Фурье, вычисленного по алгоритму быстрого преобразования Фурье.

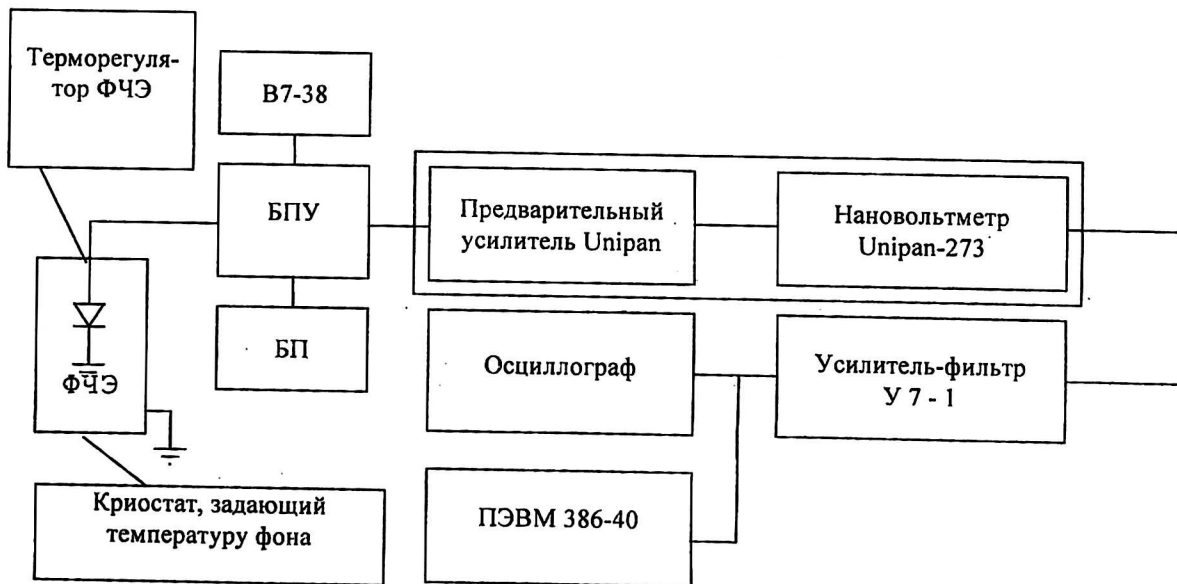


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки

Весь процесс измерения и обработки информации занимал несколько минут.

На этом измерительном комплексе в течение ряда лет было измерено большинство типов выпускаемых промышленностью ФР и ФД из InSb, в том числе ФП, хранившиеся после изготовления более 10 лет.

Измеренные ФП условно разделены на следующие группы:

ФР, изготовленные по электроэрозионной технологии с 1 (14ДА), 10 (41П) и 30 ФЧЭ (ФРО 132);

ФР, изготовленные по фотолитографической технологии с 50 (ФРО 165) и 100 ФЧЭ (ФРО 166);

ФД с одним и двумя ФЧЭ в конструкции, близкой к известной конструкции "Светлана-5" — ФДО 115(116), БС-19, изготавливаемых по радиационно-сплавной технологии с защитой *p-n*-перехода в электролите на основе 0,1 N KOH;

планарные ионно-имплантированные ФД, изготовленные по технологии, аналогичной технологии ФД ФУЛ-132.

Как правило, все эти ФП измерялись спустя 10 лет после их изготовления. На части из них проводилась дополнительная "наработка" в течение 100 ч и выдержка в нерабочем состоянии при температуре 333 К.

На рис. 2 приведена зависимость мощности шума одноэлементного фоторезистора 14ДА. Как следует из рисунка, при малых смещениях (до 0,1 В) шум типа $1/f$ переходит в "белый" шум, начиная с 1 кГц. При подаче большего смещения амплитуда шума возрастает, и точка перегиба смещается в область больших частот. Для данного класса приборов смещение 0,1 В невелика, его номинальное смещение составляет 1 В, но необходимо учитывать, что прошло 30 лет со дня их изготовления, и напряжение шума, равное 10^{-8} В/Гц^{1/2} на частоте 1000 Гц, свидетельствует как о высоких качествах данного прибора, так и о продуманности разработанной его технологии в целом.

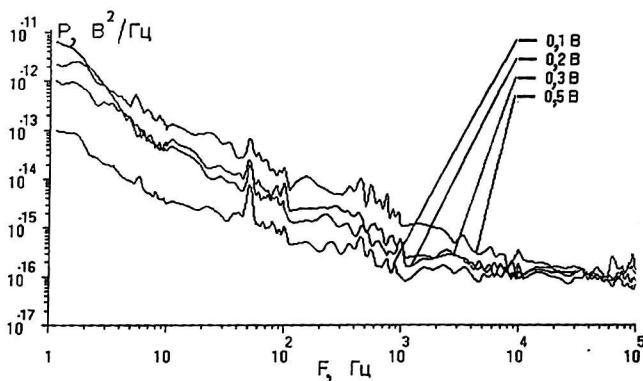


Рис. 2. СПМШ фоторезистора 14 ДА, N 21-77

На рис. 3, а представлены СПМШ одной из 30 фоточувствительных площадок многоэлементного фоторезистора ФРО 132, изготовленного также по технологии с "высокими" контактами. СПМШ этих приборов не имеют существенных отличий от одноэлементных: частота перехода от шума типа $1/f^\alpha$ в "белый" шум составляет 1 кГц при смещении 0,1 В, а при увеличении смещения до 0,5 В смещается до 10^4 Гц. Отметим, что значение α близко к единице в обоих случаях.

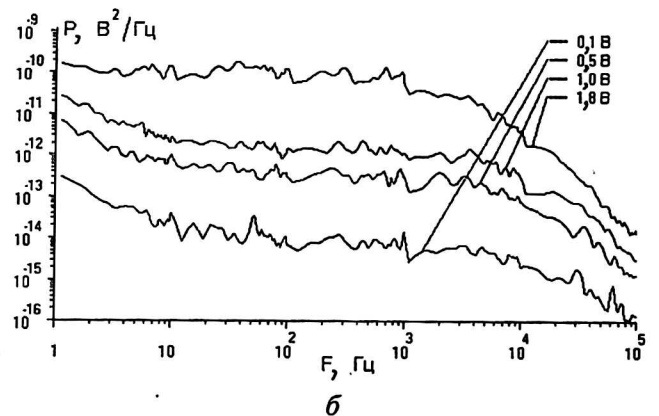
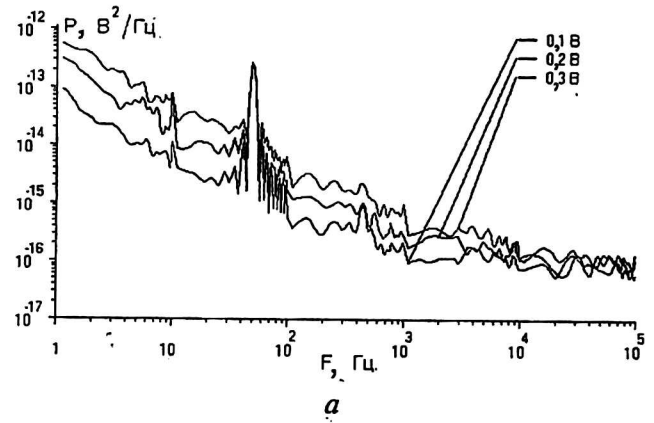


Рис. 3. СПМШ:

а — 7-й площадки 30-элементного фоторезистора ФРО 132; б — 90-й площадки 100-элементного фоторезистора при повышенных смещениях

На рис. 3, б представлены СПМШ одного из 100 ФЧЭ прибора, изготовленного с "низкими" контактами. Следует отметить, что при смещении 0,1 В "белый" шум составляет 10^{-14} В²/Гц, что на два порядка превышает значение "белого" шума предыдущих приборов. При увеличении смещения растет именно компонента "белого" шума, который "забивает" шум типа $1/f^\alpha$ в диапазоне от 1 до 10^5 Гц.

Завал характеристик в области 10^4 — 10^5 Гц связан с временем жизни носителей $\tau = 10$ мкс.

В подавляющем большинстве случаев измеренные по действующей документации параметры $[Ф_p, U_{noise}(I_{noise})]$ оставались в пределах норм ТУ на каждый вид изделий. Наиболее однородны частотные характеристики у ФР ФРО 165 (ФРО 166) и у планарных ФД, если измерения СПМШ проводились при паспортных значениях U_{fr} и в режиме КЗ у ФД.

Отметим, что у ФР ФРО 165 (ФРО 166) и в процессе производства не наблюдалось появления отдельных неработающих (выходящих за нормы ТУ) ФЧЭ.

У отдельных ФР типа 41П изредка наблюдалось ухудшение значений $Ф_p$ за пределы норм ТУ (более 30 %) у отдельных ФЧЭ, преимущественно крайних, за счет роста избыточных ($1/f$) шумов. Они часто наблюдались после выдержки при повышенных температурах.

На рис. 4 представлены СПМШ одноэлементных фотодиодов, изготовленных по радиационно-сплавной технологии, также разработанной в НИИПФ под руководством И. И. Таубкина и Ю. М. Люстрова. Приборы относятся к двум группам: с пологой вольт-шумовой характеристикой (см. рис. 4, а) и имеющей резкий минимум вблизи нулевого смещения (см. рис. 4, б).

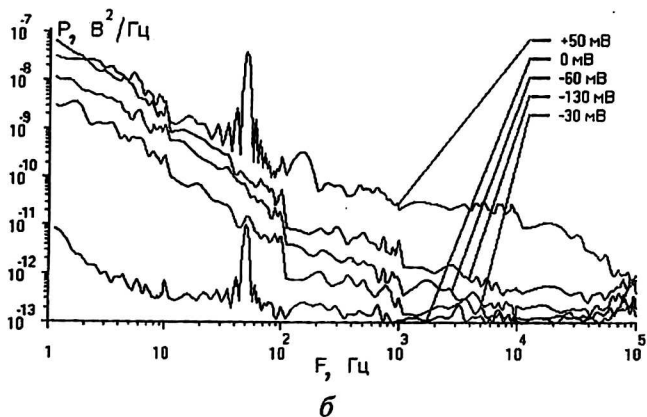
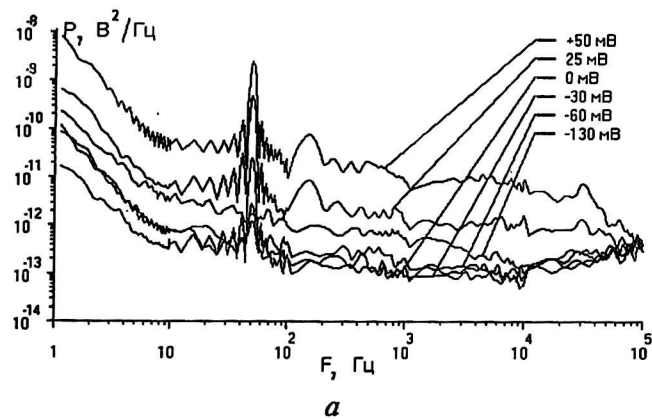


Рис. 4. Типичная зависимость СПМШ от смещения:
а — первой группы приборов;
б — второй группы приборов

Значение шума $10^{-13} \text{ В}^2/\text{Гц}$ соответствует значениям U_{noise} (2,8 и 3,1 мкВ, соответственно), зафиксированным в 1975 г., в полосе частот измерительного тракта 100 Гц. Следует отметить, что у прибора (см. рис. 4, а), имеющего большее напряжение расшумливания, шум типа $1/f^\alpha$ ярко выражен в диапазоне частот 1—10 Гц при значении α , близком к двум, в то время как у прибора (см. рис. 4, б) при нулевом смещении шум типа $1/f^\alpha$ наблюдается только в диапазоне 1—10 Гц, затем растет как при прямом, так и при обратном смещении, при этом значение α близко к единице.

В общем случае у ФЧЭ, изготовленных на эффекте Мосса-Бурштейна, защищенных в электролите на основе КОН, наблюдались деформации спектра шума после выдержки ФД при температуре 338 К, если измерения характеристик проводились при смещении на ФД в пределах $+10 \div -30$ мВ. Возрастание шумов у таких ФД имело как обратимый (в течение 5—7 сут), так и необратимый характер.

Сообщения в работах [3—5] показали, что СПМШ капсул многоэлементных структур, разработанных в ходе проведения совместных работ НИИПФ — АОМЗ "Сапфир", зависят как от величины смещения, прикладываемого к ФД, так и от технологии изготовления и конструкции ФЧЭ.

На рис. 5, а, б представлены СПМШ типичного ФЧЭ, изготовленного на антимониде индия с анодной окисной пленкой, выращенной в электролите на основе персульфата аммония при смещении 0, -50 и -100 мВ. Как видно из рисунка, при малых смещениях шум типа $1/f$ отсутствует, и только при смещении -100 мВ проявляется в частотном диапазоне 1—10 Гц. В связи с этим для сравнения различных технологий и топологий ФЧЭ мы выбрали СПМШ при смещении -100 мВ. На рис. 6, а, б представлены типичные СПМШ четырех ФЧЭ линеек, окисленных в различных электролитах: на основе персульфата аммония (см. рис. 6, а) и сернистого натрия (см. рис. 6, б). Из рис. 6, а следует, что значения шумового сигнала при 1 Гц изменяются от $3 \cdot 10^{-25}$ до $3 \cdot 10^{-23} \text{ А}^2/\text{Гц}$. Изменение же электролита (см. рис. 6, б) приводит не только к идентичности характеристик, но и к снижению шума типа $1/f$ до значения шумового сигнала при 1 Гц до $2 \cdot 10^{-25} \text{ А}^2/\text{Гц}$.

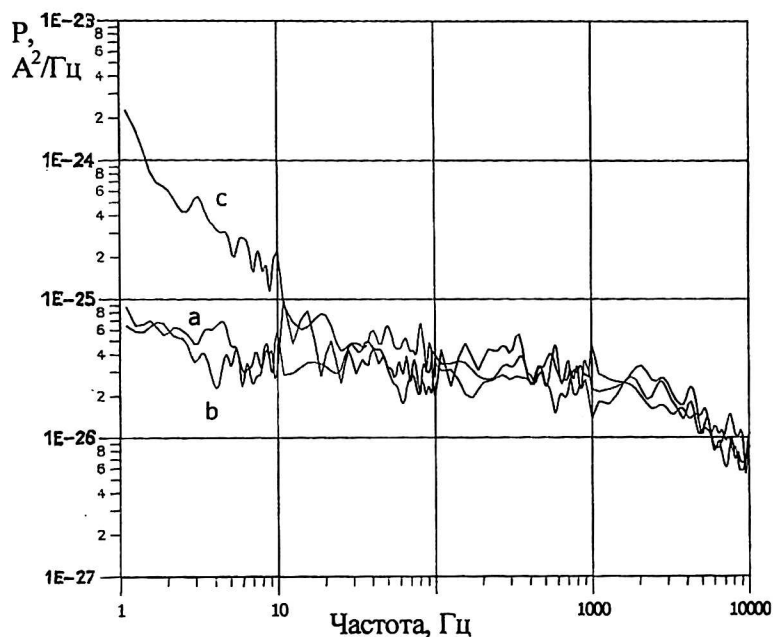
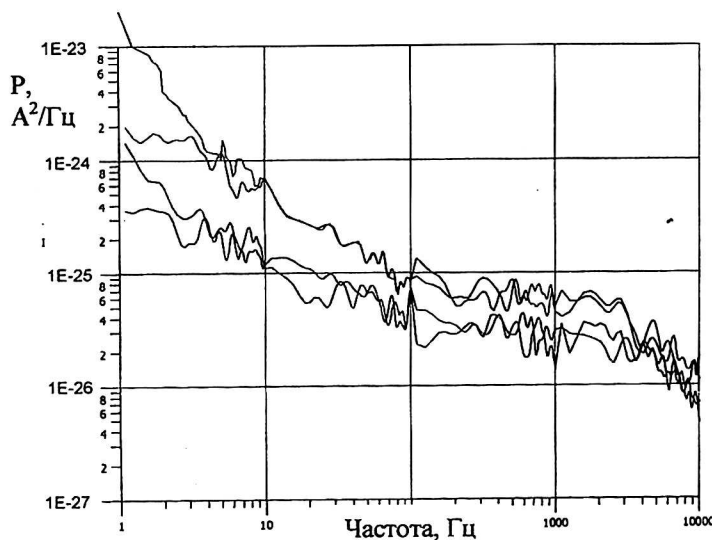
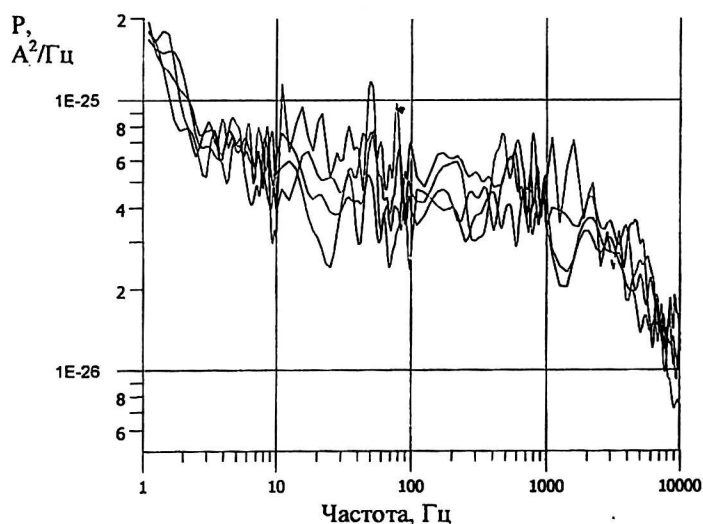


Рис. 5. СПМШ ФЧЭ линеек, окисленных в электролите на основе персульфата аммония



а



б

Рис. 6. СПМШ четырех ФЧЭ, окисленных в электролите на основе:
а — персульфата аммония; б — сернистого натрия

Использование изменяющейся температуры фона позволяет проверить гипотезы о природе НЧ шумов, в частности, СПМШ, представленных на рис. 7, и сделать вывод о том, что шум типа $1/f$ не связан со значением фоновой нагрузки, а следовательно, и с механизмами объемного поглощения излучения спектрального состава, соответствующего данному диапазону температур.

По нашим представлениям, наибольшая информация о качестве элементов может быть получена из частотной характеристики ФП, изме-

ренной при сниженном окружающем фоне, после того как этот ФП выдерживался при температуре 330—350 К в течение 20—100 ч.

Заключение

Изготовлена оригинальная установка и создано математическое обеспечение, позволяющие оценить качество имеющейся или вновь разрабатываемой технологии полупроводниковых приборов и проводить дальнейшие работы по прогнозированию надежности приборов с использованием неразрушающего метода.

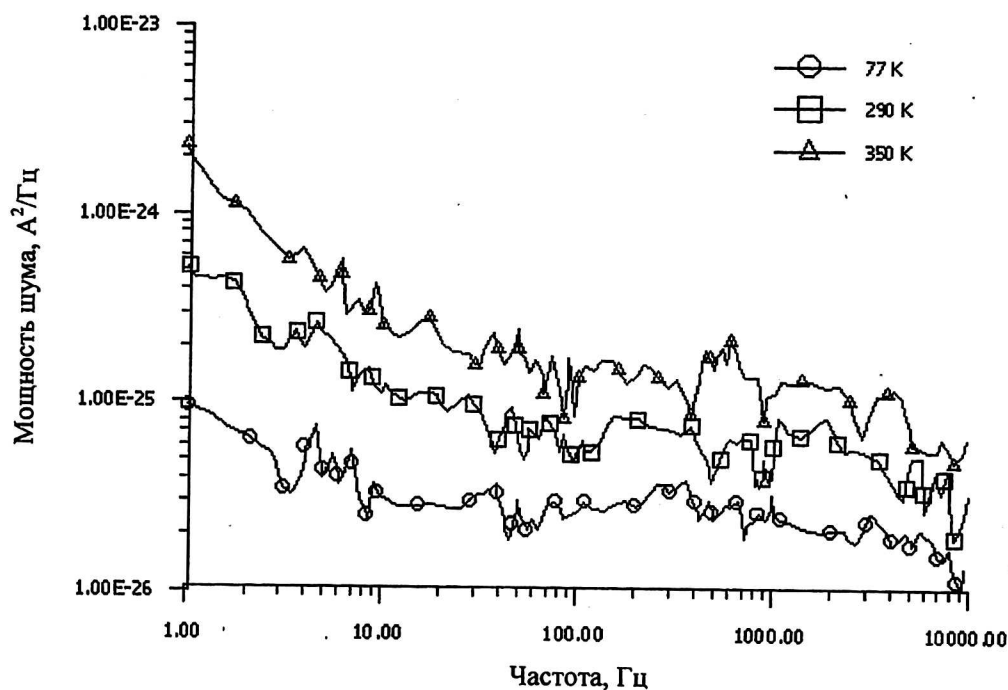


Рис. 7. СПМШ ФЧЭ линеек при различных температурах фона

Литература

1. Соколик С. А., Гуляев А. М., Мухина О. Б. Криостат: Пат. 179944, 1992.

2. Соколик С. А., Гуляев А. М., Мирошникова И. Н. Совершенствование установки для исследования низкочастотного шума полупроводниковых приборов и структур// Измерительная техника. 1997. № 1. С. 61—65.

3. Мирошникова И. Н., Соколик С. А., Гуляев А. М. Повышение надежности фотодиодов из антимонида индия// Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах (метрология, диагностика, технология): Матер. докл. науч.-техн. семинара (пос. Черноголовка, Моск. обл.,

25—29 ноября 1991; Москва, 1—3 декабря 1992.). — М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 1993. С. 124—128.

4. Мирошникова И. Н., Соколик С. А., Варлашов И. Б., Гуляев А. М. Анализ путей повышения надежности фотодиодов из антимонида индия// Там же. (Москва, 23—25 ноября 1993.). — М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 1994. С. 121—125.

5. Мирошникова И. Н., Соколик С. А., Варлашов И. Б., Гуляев А. М. О природе взрывных и избыточных шумов в фотодиодах на основе антимонида индия// Там же (Москва, 28 ноября—1 декабря 1994.). — М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 1995. С. 208—216.

Application of a noise spectroscopy for reliability prediction of IR detectors on the basis of antimonide of indium

I. N. Miroshnikova, A. M. Gulyaev, D. A. Nedoruba
Moscow Power Institute, Moscow, Russia

The original installation was designed and manufactured, and also the relevant software was created, which allow to estimate quality of an available or again developed technology for IR detectors on the basis of antimonide of indium.