

ДИАГНОСТИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ ПО ПАРАМЕТРАМ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА

© 2022 г. М.И. Горлов^{1,*}, В.А. Сергеев^{2,3,**}

¹Воронежский государственный технический университет,
Россия 394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

²УФирЭ им. В.А. Котельникова РАН, Россия 432073 Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2

³Ульяновский государственный технический университет,
Россия 432029 Ульяновск, ул. Серверный венец, 32
E-mail: *m-gorlov@inbox.ru; **sva@ulstu.ru

Поступила в редакцию 07.12.2021; после доработки 17.12.2021

Принята к публикации 17.12.2021

Рассмотрена возможность и описаны практические способы диагностики и прогнозирования надежности полупроводниковых изделий как по параметрам только их собственного низкочастотного (НЧ) шума, так и по параметрам комбинированных испытаний, например, по результатам измерения НЧ шума при воздействии электростатического разряда и (или) термического отжига. Представлены оценки достоверности рассмотренных способов. Показано, что достоверность комбинированных испытаний приближается к единице.

Ключевые слова: интегральные схемы, качество, надежность, низкочастотный шум, диагностика, прогнозирование.

DOI: 10.31857/S013030822201002X

ВВЕДЕНИЕ

В семидесятые годы прошлого века Воронежский завод полупроводниковых приборов (ВЗПП) приступил к серийному производству интегральных микросхем (ИС) по технологии с оксидной изоляцией карманов серий 106, 134, получивших широкое применение в космическом приборостроении. Потребители ИС, как правило, проводили входной контроль полученных от ВЗПП ИС. При этом для повышения надежности аппаратуры потребители использовали расширенный входной контроль ИС. От одного из потребителей завод получил рекламацию и возврат партии ИС, которые имели большой разброс по уровню низкочастотного (НЧ) шума, что, по мнению потребителя, свидетельствовало о потенциальной ненадежности ИС. Представленные образцы ИС, которые по данным потребителя показывали большой уровень НЧ-шума, были поставлены на ВЗПП на испытания на долговечность в течение 5000 часов. Испытания этой партии закончились без отказов, но работа по повышению качества и надежности ИС на ВЗПП на этом не прекратилась. Этот случай послужил толчком для активных работ на предприятии по исследованию возможностей диагностики и прогнозирования надежности ИС по параметрам НЧ-шума.

В те годы исследования методов диагностики и прогнозирования надежности полупроводниковых изделий по параметрам НЧ-шума широко проводились в отечественных [1—4] и зарубежных [5] вузах и лабораториях. Наряду с фундаментальными исследованиями природы и характеристик НЧ-шума полупроводниковых изделий (ППИ) под руководством Н.Б. Лукьянчиковой [2], А.К. Нарышкина и А.С. Врачева [3], В. Жалуда и В.Н. Кулешова [4] и др. активно развивались и прикладные исследования [1, 6].

Прикладные исследования диагностических методов с использованием параметров НЧ-шума в качестве информативного параметра продолжают и в настоящее время как в России [7], так и за рубежом [8].

Цель данной статьи — показать возможности и привести оценку эффективности разработанных, апробированных на практике и получивших дальнейшее развитие в последние годы в ВГТУ и УФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН способов разделения ИС по надежности с использованием параметров НЧ шума и дополнительных воздействий.

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО НЕНАДЕЖНЫХ ИС ПО ПАРАМЕТРАМ СПЕКТРА НЧ-ШУМА

Первые работы по определению возможности индивидуального прогнозирования потенциально ненадежных ИС по критериям спектра НЧ-шума появились еще в семидесятые годы прошлого

века. Как показали многочисленные исследования, частотная зависимость спектральной плотности мощности шумового напряжения у ИС различных классов и типов в диапазоне звуковых частот описывается выражением:

$$S_{\text{ш}}(f) = A/f^{\gamma}, \quad (1)$$

где A — параметр, характеризующий уровень шума; γ — показатель формы спектра; НЧ-шум называют еще $1/f$ -шумом или фликкер-шумом.

Измерив параметры спектра НЧ-шума на нескольких частотах, можно определить уровень шума на любых низких частотах и попробовать прогнозировать дрейф параметров ИС по величине и амплитуде шума [1, 8, 9]. Измерения, например, спектра шума аналоговых ИС типа 142ЕН1 (стабилизатор напряжения) на специализированной установке для измерения теплоэлектрических параметров интегральных схем показали [6], что разброс по уровню шума различных образцов ИС достигает двух порядков величины. Аналогичные спектральные характеристики наблюдались у НЧ-шума на выходе аналоговых операционных усилителей К153УД при номинальном напряжении питания.

Гистограммы распределения выборки ИС типа 142ЕН2 в количестве 130 шт. и выборки ИС типа К153УД в количестве 172 шт. по спектральной плотности мощности шума, измеренной при номинальном напряжении на частоте 300 Гц, приведены на рис. 1.

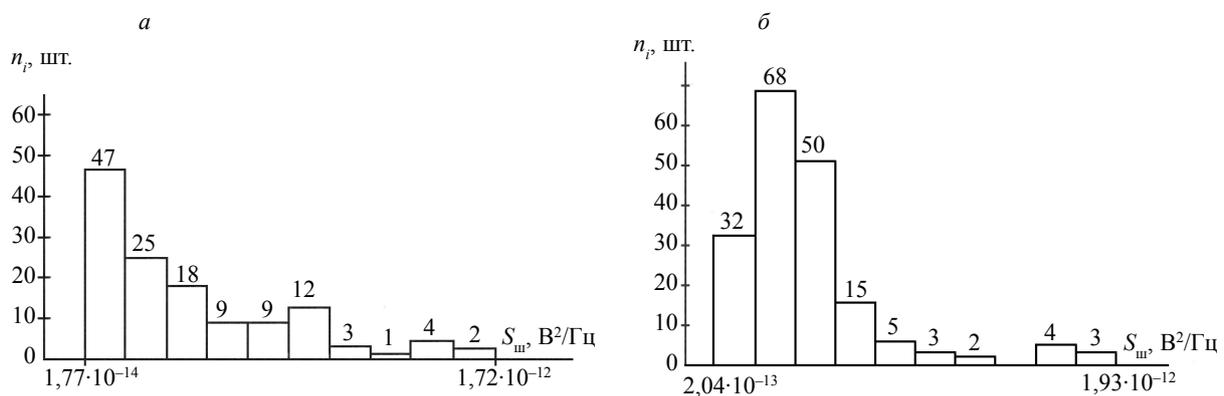


Рис. 1. Гистограммы распределения ИС типа К142ЕН2 (а) и типа К153УД (б) по уровню НЧ-шума.

На обеих гистограммах можно выделить группы ИС (вторые моды распределения) с аномально большим отклонением уровня шума от среднего значения. Эти группы ИС при ускоренных на надежность испытаниях отказывают с интенсивностью, превышающей среднюю интенсивность отказов примерно в 3-5 раз.

Однако простое измерение уровня шума ИС в номинальном режиме их работы является недостаточно информативным. Анализ спектрограмм НЧ-шума тонкопленочных резисторов, диодов, транзисторов и ИС показывает, что спектры таких флуктуаций занимают промежуточное положение между линейчатыми и сплошными спектрами [9]. Это позволяет предполагать наличие некоторой регулярности в процессах, приводящих к их появлению, и связи этих шумов с неоднородностями и дефектами изделий.

В подтверждение этой идеи были исследованы спектры НЧ-шума ИС серии 106 (биполярные ТТЛ ИС с диэлектрической изоляцией карманов). Для обоснования режимов и норм при измерении характеристик НЧ-шума были исследованы распределения уровня шума ИС для различных частот на разных партиях, зависимости уровня шума от величины нагрузки, величины входного напряжения, от температуры в диапазоне от -70 до $+170$ °С при определенном напряжении питания ИС.

При измерении шумов при различных температурах обнаружен довольно сильный разброс значений от образца к образцу (до 40 % от среднего значения). Рост шумов при нагревании до $+170$ °С незначителен. Несколько больше замечен рост шумов при охлаждении до -70 °С. Это подтверждает механизм возникновения шума типа $1/f$ при низких температурах, когда плотность поверхностных состояний возрастает к краю от зоны проводимости, что приводит к росту шума.

При постоянном напряжении питания $U_{пит}$ уровень шума ИС зависит от величины нагрузки и величины входного напряжения. Максимальное значение шумового напряжения на всех частотах данного эксперимента (160 Гц, 1 кГц, 20 кГц, 1 МГц, 5 МГц) обнаруживается при входных напряжениях 1,3 — 1,4 В при $U_{пит} = 4,5$ В и сопротивлении нагрузки 470 Ом (активная область передаточной характеристики). В этом режиме проходили и все дальнейшие исследования шумов ИС серии 106. В работах [10,11] показано, что для информативности достаточно ограничиться частотами 160 Гц и 1кГц.

Измерение мощности шума или среднего квадрата шумового напряжения ($\bar{U}_{ш}^2$) проводили на специализированной установке по методу прямого усиления с непосредственным отсчетом на ламповом вольтметре. Усилитель низкой частоты с набором Т-образных полосовых фильтров, настроенных на средние частоты 160 Гц и 1 кГц, имеет соответствующие коэффициенты усиления для этих частот. Питание установки и исследуемых ИС осуществляли от аккумуляторов, узлы установки тщательно экранировались. Измеряли шумовые характеристики ИС, их статические и динамические параметры в процессе длительной электротренировки (ЭТТ) для получения характера распределения отказов во времени от режима ЭТТ и связи этих параметров с шумовыми критериями. Интегральные распределения статических, динамических и шумовых параметров ИС в процессе различных внешних воздействий позволили выявить информативные электрические параметры, нестабильность которых сказывается на поведении шумовых характеристик. Ухудшение таких параметров схем, как U_{OL} , U_{OH} , $I_{пит.дин}$, $I_{пит.ст}$ вызывает ухудшение шумовых характеристик. В дальнейшем эти параметры были использованы для прогнозирования потенциально ненадежных ИС по критериям НЧ-шума.

Таблица 1

Виды дефектов и количества отказов ИС при испытаниях

Отличительный признак	Распределение ИС $U_{ш}^2$, мВ ² , на частотах				Количество отказов при испытаниях на						
	160 Гц		1 кГц		ЭТТ при 125 °С в течение, ч	безотказность при 125 °С и 50 Гц в течение, ч		надежность при 25 °С и 50 Гц в течение, ч			
	80–130	130–190	40–80	80–140		100	100	500	1000	2000	3000
Недошлифовка карманов (21 шт.)	21	–	21	–	0	0	0	0	0	0	0
Зауженная металлизация (50 шт.)	50	–	50	–	0	0	0	0	0	0	0
Растравление оксида под металлизацией (25 шт.)	22	3	22	3	2	0	1	1	2	0	0
Локальная неравномерность оксида (28 шт.)	20	8	20	8	3	3	2	2	0	3	3
Дырки в оксиде и дефекты включения в SiO ₂ (20 шт.)	13	7	13	7	4	0	1	1	2	3	2
Бездефектные (50 шт.)	50	–	50	0	0	0	0	0	0	0	0

Для исследования отбирались кристаллы ИС с определенными видами дефектов и рассматривалось влияние этих дефектов на электропараметры и шумы. Виды отказов и число отказов ИС показаны в табл. 1 [12]. Видно, что 10 % ИС из всех партий имеют уровень шума выше уста-

новленных критических значений $\bar{U}_{ш}^2 > 130 \text{ мВ}^2$ на частоте 160 Гц и $\bar{U}_{ш}^2 > 80 \text{ мВ}^2$ на частоте 1 кГц. Анализ причин отказов ИС при испытаниях показал, что являются недопустимыми в процессе производства и имеют связь с шумами типа $1/f$ следующие дефекты:

растравливание оксида под металлизацией;

растравливание оксида по дефекту фотошаблонов (локальная неравномерность) на элементы схемы;

дырки в оксиде, расположенные на $p-n$ -переходах и вблизи $p-n$ -перехода, приводящие к возникновению паразитных утечек или ухудшению изоляции схемы;

дефекты включения в оксид, расположенные в элементах ИС или на границе $p-n$ -переходов.

ИС с допустимыми по технологическому циклу дефектами (недошлифовка, зауженная металлизация и др.) и уровнем шума ниже установленных критериев не имеют отказов при наработке до 15000 ч. При соответствующем режиме измерения уровень НЧ-шумов ИС характеризует основной механизм параметрических отказов ИС за счет поверхностных дефектов. Выявлено, что основным механизмом деградации кремниевого $p-n$ -перехода является процесс инверсии поверхности, энергия активации которого мала. Это обстоятельство определяет выбор воздействующего фактора для быстрого выявления процесса инверсии какого-либо перехода в ИС. Таким эффективно воздействующим фактором является повышенное напряжение питания ИС (10 В), при котором процессы деградации проявляются в аномальных значениях уровня избыточных шумов, значительно превышающих уровни установленных критических значений. Критериями шумовых характеристик при отбраковке ИС серии 106 являются величины $\bar{U}_{ш}^2$, $S_{ш}$ на частоте 160 Гц ($\bar{U}_{ш1}^2 > 130 \text{ мВ}^2$, $S_{ш1} > 1,3 \text{ мкВ}^2/\text{Гц}$) и на частоте 1кГц ($\bar{U}_{ш2}^2 > 80 \text{ мВ}^2$, $S_{ш2} > 0,08 \text{ мкВ}^2/\text{Гц}$).

Таблица 2

Количество фактически отказавших ИС при испытаниях различных видов

Наименование этапов расчета	Обозначение	Вид испытания					Сводные данные по 5 партиям
		ЭТТ (ступенчатый режим при 125 °С)	ЭТТ (ступенчатый режим при 25 °С)	ЭТТ (форсированный режим при 125 °С)	ЭТТ (форсированный режим при 25 °С)	ЭТТ (режим ТУ при 125 °С)	
Количество схем	N	360	121	224	95	500	1300
Количество отказов	N_1	41	7	10	3	1	62
Процент отказов	$(N_1/N) \times 100$	11,4	5,8	4,46	3,16	0,2	4,8
Количество отказов, прогнозир. по шумам	n_1	32	6	8	3	1	50
Количество годных схем, прогнозир. по шумам, как отказавших	n_2	134	41	16	17	21	229
Суммарное количество прогнозир. отказов	$(n_1 + n_2)$	166	47	24	20	22	279
Процент прогнозир. отказов	$(n_1 + n_2) \times 100/N$	46,1	38,8	10,7	21,1	4,4	21,5
Процент прогнозир. отказов по шумам	$N_1 \times 100/(n_1 + n_2)$	19,3	12,8	33,3	15	4,5	17
Процент отказов не прогнозир. по шумам	$(N_1 - n_1) \times 100/(N - n_1 + n_2)$	4,6	1,3	0,01	0	0	1,18

Как видно из табл. 2 (сводные данные), процент фактически отказавших ИС равен 4,8 вместо 21,5 % (ожидаемого по прогнозу), что составляет всего 17,9 % отказавших ИС от числа прогнозируемых. В то же время отказало 1,18 % ИС, годных по шумовым критериям.

Поэтому, на наш взгляд, из-за малой достоверности методов, использующих шумовые критерии, они не могут быть рекомендованы в состав отбраковочных испытаний как методы индивидуального прогнозирования потенциально ненадежных ИС, но могут быть применены для сравнения различных технологических партий. Это мнение получило подтверждение в работе [13], где изложены результаты измерений шумовых характеристик кристаллов ИС на пластинах на специально разработанной авторами высокочувствительной установке. Эти измерения позволяют:

- проводить отбраковку сильношумящих изделий прямо на пластине;
- оперативно устанавливать источники и причины появления НЧ-шума в процессе изготовления изделий и вносить коррективы в соответствующие технологические режимы;
- выяснить влияние операций резки, монтажа и сборки на шумовые характеристики изделий и отрабатывать их оптимальные режимы;
- получать данные о степени неоднородности распределения шумовых характеристик на пластинах.

Измерение спектральной плотности шумового напряжения, приведенной к входу изделия (ИС, транзистора), показало совпадение уровней шума в ИС на пластине и в готовых изделиях. Это указывает на то, что операции сборки, выполняемые при изготовлении ИС из годных кристаллов на пластине, обычно не вносят дополнительного шума даже в тех случаях, когда шум схем весьма мал.

РАЗДЕЛЕНИЕ ИС ПО НАДЕЖНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРОВ НЧ-ШУМА

Разработка и проверка первых трех методов проводились на ИС типа К137ЛЕ2 (2 элемента ЗИЛИ—НЕ в 14 выводном корпусе DIP, эмиттерно-связанная логика).

Для эксперимента было отобрано методом случайной выборки 20 ИС типа К137ЛЕ2. Измерение $\bar{U}_{ш}^2$ проводилось для одного элемента ЗИЛИ—НЕ-схемы методом прямого измерения без подачи напряжения общего питания с заданием рабочего тока через выводы «вход — общая точка» от внешнего источника напряжения. Измерения $\bar{U}_{ш}^2$ проводилось в диапазоне частот 900—1100 Гц (центральная частота 1 кГц, полоса частот $\Delta f = 200$ Гц, время усреднения $\tau = 2$ с).

Первый способ оценки надежности основан на анализе зависимости $\bar{U}_{ш}^2$ от тока для входных выводов, полученной по результатам вышеописанного эксперимента (рис. 2).

Из рис. 2 для наихудшей (ИС № 2) и наилучшей (ИС № 4) зависимостей видно, что при значении тока до 8 мА зависимость $\bar{U}_{ш}^2$ от тока имеет вид прямой, а при значениях тока 10 мА у ряда схем значение $\bar{U}_{ш}^2$ резко возрастает, поэтому измерение $\bar{U}_{ш}^2$ проводили при двух значениях тока: 6 и 10 мА.

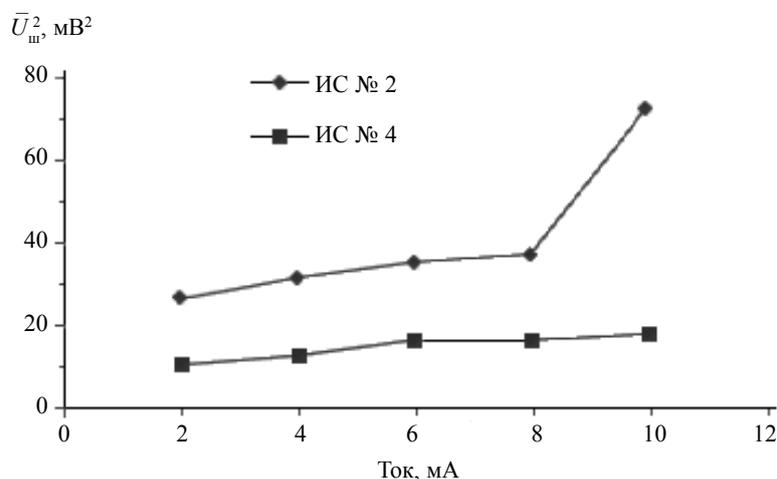


Рис. 2. Зависимость $\bar{U}_{ш}^2$ от тока по выводам «вход—общая точка».

В табл. 3 приведены значения $\bar{U}_{ш}^2$ при токах 6 и 10 мА и коэффициент их относительного изменения $\bar{U}_{ш}^2 : K = \bar{U}_{ш10}^2 / \bar{U}_{ш6}^2$ с увеличением тока.

Уровень шума ($\bar{U}_{ш}^2$) ИС типа К137ЛЕ2 при токах 6 и 10 мА и коэффициент их относительного изменения

№ ИС	Значения $\bar{U}_{ш}^2$, мВ ² , при токе, мА		$K = \bar{U}_{ш10}^2 / \bar{U}_{ш6}^2$
	6	10	
1	22	30	1,36
2	34	70	2,06
3	30	37	1,23
4	15	15	1,00
5	21	22	1,05
6	23	34	1,48
7	23	34	1,48
8	21	30	1,43
9	21	25	1,19
10	22	29	1,32
11	24	35	1,46
12	21	28	1,33
13	20	25	1,25
14	25	30	1,20
15	27	33	1,22
16	18	22	1,22
17	17	18	1,06
18	24	32	1,33
19	21	30	1,43
20	25	41	1,64

Если выбрать критерий, что для надежных схем $K < 1,5$, то схемы № 2, 20 по этому критерию будут потенциально ненадежными.

Второй способ является способом разделения ИС по надежности. Он основан на зависимости $\bar{U}_{ш}^2$ от напряжения питания. Результаты измерения уровня НЧ-шума 20 ИС при напряжении питания 2 В (значение критического напряжения питания для ИС данного типа) и 5 В (номинальное напряжение питания) представлены в табл. 4, где приведены также значения относительного увеличения интенсивности шума $K = \bar{U}_{ш5}^2 / \bar{U}_{ш2}^2$.

Если выбрать критерий, что для надежных схем $K < 2,8$, то схемы № 2, 20 по этому критерию будут потенциально ненадежными. Можно разделить партию по надежности на три группы: ИС повышенной надежности, имеющие значение $K < 2$ (схемы № 3, 4, 9, 14, 15, 16, 17); ИС с надежностью, соответствующей техническим условиям, имеющие значения $2 < K < 2,8$ (схемы № 1, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 18, 19) и ИС потенциально ненадежные, имеющие значение $K > 2,8$ (схемы № 2, 20).

Подтверждение разделения партии ИС на надежные и потенциально ненадежные было получено в результате испытаний на безотказность (500 ч, повышенная температура, максимально допустимая нагрузка), когда ИС № 2, 20 имели параметрический отказ.

Третий способ также является способом разделения ИС по надежности. Этот способ более достоверный, поскольку активация дефектов в структуре ППИ имеет температурную зависимость, но более трудоемкий. Он основан на зависимости $\bar{U}_{ш}^2$ от температуры. Прямой рабочий ток, проходя по структуре ИС, позволяет регистрировать $\bar{U}_{ш}^2$, порожденный дефектами структуры, имеющими температурную зависимость [11]. Для каждой ИС по результатам измерений подсчитывался коэффициент K по формуле:

$$K = \frac{|\bar{U}_{ш100}^2 - \bar{U}_{ш25}^2| + |\bar{U}_{ш25}^2 - \bar{U}_{ш0}^2|}{\bar{U}_{ш25}^2}, \quad (2)$$

где $\bar{U}_{ш25}^2$, $\bar{U}_{ш0}^2$, $\bar{U}_{ш100}^2$ — значения уровня шума при температурах, соответствующих нормальной, нулевой и 100 °С.

Таблица 4

Уровень НЧ-шума ИС типа К137ЛЕ2 при двух значениях напряжения питания

№ ИС	Значения \bar{U}_m^2 , мВ ² , при напряжении питания, В		$K = \bar{U}_{m5}^2 / \bar{U}_{m2}^2$
	2	5	
1	52	130	2,50
2	50	190	3,80
3	77	148	1,92
4	63	95	1,51
5	52	110	2,12
6	52	142	2,73
7	55	143	2,60
8	48	128	2,67
9	59	112	1,90
10	53	129	2,43
11	58	147	2,53
12	55	122	2,22
13	53	112	2,11
14	68	127	1,87
15	78	141	1,81
16	63	111	1,76
17	59	97	1,64
18	56	140	2,50
19	50	128	2,56
20	58	164	2,83

Данные измерений и коэффициента K представлены в табл. 5. Если выбрать критерий для надежных схем $K < 0,7$, то схемы № 2, 5 будут потенциально ненадежными.

Таблица 5

Уровень НЧ-шума ИС типа К137ЛЕ2 при различных температурах

№ ИС	№ вывода	\bar{U}_m^2 , мВ ² , при токе 6 мА и температуре			К
		0°С	25°С	100°С	
1	3	27	22	28	0,5
	4	26	22	29	0,5
	5	25	21	26	0,43
2	3	43	34	56	0,91
	4	45	35	59	0,97
	5	42	33	54	0,91
3	3	36	31	40	0,45
	4	34	30	38	0,4
	5	35	30	37	0,4
4	3	17	15	20	0,47
	4	17	15	20	0,47
	5	16	15	18	0,27
5	3	28	20	27	0,75
	4	28	21	29	0,71
	5	30	22	30	0,73

Четвертый способ — способ разделения ИС по надежности с использованием показателя формы спектра НЧ-шума апробирован на ИС типа КР537РУ13 (статическое ОЗУ, выполненное по

технологии КМОП, напряжение питания по ТУ $5 \text{ В} \pm 10 \%$). Методом случайной выборки было отобрано 10 ИС указанного типа, у которых методом прямого измерения измерялось значение $\bar{U}_{\text{ш}}^2$ по выводам «питание — общая точка» на частотах 200 Гц и 1 кГц, ширина полосы частот $\Delta f = 200$ Гц, время усреднения $\tau = 2$ с [14].

Для предварительной оценки были измерены зависимости $\bar{U}_{\text{ш}}^2$ на частоте 1000 Гц от напряжения питания на 5 ИС данного типа (рис. 3). Из рис. 3 видно, что при питании 5 В происходит более заметный разброс значений $\bar{U}_{\text{ш}}^2$ отдельных ИС. Именно это значение напряжения было выбрано для измерения шума на частотах 200 Гц и 1 кГц (табл. 6). Параметр показатель формы спектра γ определяли из выражения (1) по следующей формуле:

$$\gamma = \frac{\lg(\bar{U}_{\text{ш}200}^2 / \bar{U}_{\text{ш}1000}^2)}{\lg(1000/200)} = 1,43 \lg(\bar{U}_{\text{ш}200}^2 / \bar{U}_{\text{ш}1000}^2), \quad (3)$$

где $\bar{U}_{\text{ш}200}^2$ и $\bar{U}_{\text{ш}1000}^2$ — значения шума на частотах 200 и 1000 Гц соответственно.

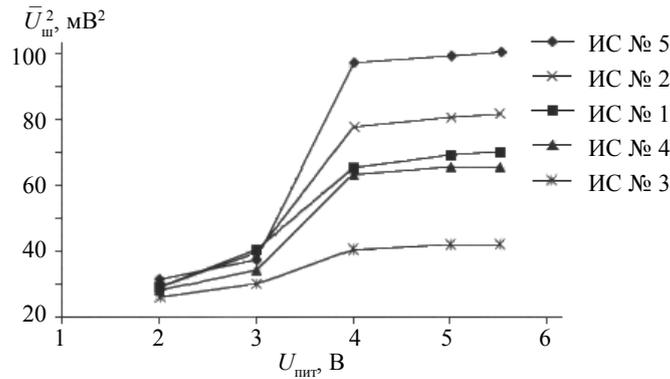


Рис. 3. Зависимость уровня шума на выводах «питание — общая точка» от напряжения питания для ИС типа КР537РУ13.

Если выбрать критерий для надежных схем $\gamma < 1,3$, то схемы № 5, 8 будут потенциально ненадежными.

Таблица 6

Уровень НЧ-шума ИС типа К137ЛЕ2 на двух частотах

№ ИС	Значение шума $\bar{U}_{\text{ш}}^2$, мкВ ² , на частотах, Гц		γ
	200	1000	
1	439,9	68	1,16
2	553,8	79	1,21
3	203,3	42	0,98
4	394,5	64	1,13
5	786	97	1,3
6	419,7	67	1,14
7	201,6	43	0,96
8	833,4	98	1,33
9	303,5	56	1,05
10	534,3	75	1,22

Можно разделить партию по надежности на три группы: ИС повышенной надежности, имеющие значение $\gamma < 1$ (схемы № 3, 7); ИС с надежностью, соответствующей техническим усло-

виям, имеющие значения $1 < \gamma < 1,3$ (схемы 9, 4, 6, 1, 2, 10), и ИС — потенциально ненадежные, имеющие значение $\gamma < 1,3$ (схемы № 5,8). При проведении испытаний на безотказность (500 ч, 85 °С) ИС № 5, 8 имели параметрические отказы.

Пятый способ — способ разделения ППИ по надежности с использованием параметров шума и воздействия электростатических разрядов (ЭСР), который заключается в том, что на партии ППИ проводят измерения уровня НЧ-шума при нормальных условиях, затем воздействуют 5—10 импульсами ЭСР обоих знаков допустимой по ТУ величины, проводят температурный отжиг при максимально допустимой по ТУ температуре кристалла прибора в течение 4—6 ч и вновь измеряют уровень шума при нормальной температуре. Определяют разность уровней шума при начальном замере и после отжига для каждого ППИ: $\Delta = (\bar{U}_{шн}^2 - \bar{U}_{шотж}^2)$. ППИ считается более надежным при выполнении критерия: $\Delta < A$. Величина A устанавливается по набору статистики для каждого типа приборов [14—16].

Пример осуществления способа приведен в работе [17]. На 23 полупроводниковых резисторах интегральной схемы типа КА1034НРЗ были измерены значения уровня шума до, после воздействия пятью импульсами ЭСР напряжения амплитудой ± 800 В и после отжига при температуре 100 °С в течение четырех часов и представлены в табл. 7.

Таблица 7

Значения уровня шума ИС типа КА1034НРЗ до, после воздействия ЭСР и после изотермического отжига при температуре 100 °С в течение четырех часов

№ прибора	Значение $\bar{U}_{ш}^2$, мВ ²			Δ , мВ ²
	начальное	после ЭСР	после отжига	
1	1,9	2,8	1,9	0
2	1,8	2,6	1,9	0,1
3	1,95	2,7	2,0	0,05
4	2,05	3,8	2,05	0
5	3,00	4,8	2,8	0,2
6	1,98	2,7	1,98	0
7	2,15	3,9	2,25	0,1
8	1,2	4,0	2,4	0,2
9	2,58	4,0	2,68	0,1
10	2,35	4,2	2,45	0,2
11	1,98	2,8	1,98	0
12	2,5	3,9	2,7	0,2
13	2,32	3,5	2,4	0,08
14	2,4	3,7	2,6	0,2
15	3,2	5,0	3,6	0,4
16	2,6	4,2	2,7	0,1
17	2,9	4,7	3,1	0,2
18	2,8	4,8	3,0	0,2
19	2,0	3,0	2,0	0
20	2,1	3,4	2,2	0,1
21	1,95	2,6	1,95	0
22	2,35	3,7	2,55	0,2
23	2,19	2,9	2,22	0,03

Получены следующие данные по величине $\Delta = (\bar{U}_{шн}^2 - \bar{U}_{шотж}^2)$: 6 приборов имели разность уровня шумов до и после воздействия, равную 0 мВ²; 8 приборов < 0,1 мВ²; 8 приборов < 0,2 мВ²; 1 прибор < 0,4 мВ².

Если принять для данного типа приборов критерий для более надежных приборов $< 0,1 \text{ мВ}^2$, то приборы № 1, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 13, 16, 19, 20, 21, 23 будут более надежными, чем приборы № 5, 8, 10, 12, 14, 15, 17, 18, 22.

Шестой способ. Способ разделения ИС по надежности с помощью НЧ-шумов и термоциклирования.

С целью повышения достоверности термоциклирования и повышения его функциональных возможностей проводится измерение НЧ-шума до термоциклирования и после. Проведение составных испытаний «контроль уровня шума + термоциклирование + контроль уровня шума» позволит рассматривать поведение каждого изделия, его предрасположенность к ранним или поздним отказам.

Термоциклирование проводят в диапазоне крайних температур, допустимых по техническим условиям на изделие. Количество термоциклов не менее десяти.

Для достаточной выборки ППИ из партий одного типа находят коэффициент увеличения значений НЧ-шума после термоциклирования в сравнении с начальным значением. Выбирается критерий увеличения шума. ИС, у которых коэффициент увеличения шума будет больше установленного критерия, считается потенциально ненадежным [18].

В качестве примера проведен эксперимент на 12 ИС — операционных усилителей ОРА735 (выполненных по технологии КМОП) с диапазоном значений напряжения питания по ТУ 2,7 — 12 В) в 8 выводном корпусе DIP. Среднеквадратичное напряжение шума $\bar{U}_{\text{ш}}^2$ измерялось методом прямого измерения по выводам «питание—общая точка» на частоте 1000 Гц после проведения каждого термоцикла (0—100°C с выдержкой при каждой температуре 30 мин). Схема включения ИС — повторитель (инвертирующий вход соединен с выходом) с заземленным неинвертирующим входом. Напряжение питания выбрано 8 В, так как при этом значении наблюдается середина участка постоянного значения $\bar{U}_{\text{ш}}^2$.

Результаты измерений при составных испытаниях «контроль уровня НЧ-шума + термоциклирование + контроль уровня НЧ-шума», а также значения относительного изменения шума $N = \bar{U}_{\text{ш}10\text{тц}}^2 / \bar{U}_{\text{шнач}}^2$, где $\bar{U}_{\text{шнач}}^2$ и $\bar{U}_{\text{ш}10\text{тц}}^2$ — значение шума до термоциклирования и после 10 термоциклов соответственно, когда происходит достаточно большой разброс значений шума ИС в партии по сравнению с исходным значением, представлены в табл. 8 [19].

Таблица 8

Значение $\bar{U}_{\text{ш}}^2$, мкВ², в цепи питания ИС типа ОРА735 при термоциклировании

№ ИС	Количество термоциклов						N
	0	2	4	6	8	10	
1	2,50	2,55	2,65	2,68	2,82	2,88	1,15
2	2,69	2,97	3,03	3,08	3,24	3,28	1,22
3	2,49	2,58	2,62	2,63	2,80	2,89	1,16
4	2,54	2,70	2,74	2,82	2,88	2,93	1,15
5	2,31	2,37	2,41	2,43	2,48	2,49	1,08
6	2,53	2,70	2,75	2,82	2,91	2,99	1,18
7	2,51	2,66	2,72	2,77	2,84	2,86	1,14
8	3,13	3,31	3,59	3,76	3,86	3,88	1,24
9	2,71	2,93	3,04	3,06	3,12	3,16	1,16
10	2,41	2,52	2,57	2,65	2,69	2,72	1,13
11	2,61	2,80	2,91	2,99	3,02	3,06	1,17
12	2,53	2,65	2,74	2,79	2,84	2,91	1,15

Установив коэффициент $N < 1, 2$ для надежных ИС, можно сказать, что схемы № 2, 8 будут потенциально ненадежными. Для проверки данного вывода все ИС были подвергнуты 200 термоциклам. Схемы № 2, 8 показали снижение электрического параметра — частоты единичного усиления ниже нормы, установленной техническими условиями, а значение тока покоя в цепи питания у данных схем увеличилось в 2-3 раза, в то время как у остальных схем осталось практически без изменений.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПО РАЗЛИЧНЫМ КРИТЕРИЯМ

Эффективность диагностических методов прогнозирования надежности определяется степенью корреляционной связи между данными диагностических методов и результатами испытаний на надежность в течение 1000 ч. Представим результаты разбраковки ППИ каждым из диагностических методов в виде двух уровней надежности в числовой форме: потенциально менее надежные изделия символом «-1», приборы средней надежности «0» [20, 21].

Получим совокупность значений параметров по исследуемому методу разбраковки ППИ $X = (X_1, \dots, X_n)$, где n — количество изделий в рассматриваемой выборке, и по методу, взятому за эталон (в нашем случае эталонным методом является испытание на надежность), $Y = (Y_1, \dots, Y_n)$. Коэффициент корреляции β между совокупностями данных X и Y будет иметь вид [22]:

$$\rho = \frac{1}{n-1} \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sigma_X \sigma_Y}, \tag{4}$$

где \bar{X} и \bar{Y} — математические ожидания, рассчитываемые по формулам:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{и} \quad \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i, \tag{5}$$

а σ_X и σ_Y — среднеквадратичные отклонения, рассчитываемые по формулам:

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}; \quad \sigma_Y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}. \tag{6}$$

Таблица 9

Коэффициент корреляции для диагностических методов разделения ИС по надежности

№ метода	Название способа разделения ИС по надежности	Количество ИС	Результаты		Результаты на надежность (2000 ч)		Коэффициент корреляции ρ
			критерий	забракованные схемы №	критерий	забракованные схемы №	
1	Способ с использованием зависимости НЧ-шума от тока	110	$K \leq 1,5$	21, 37, 51, 53	$U_0 \geq 4,85$	21,37, 51,53	1,0000
2	Способ с использованием зависимости НЧ-шума от напряжения питания	110	$K \leq 1,75$	21,37, 51,53			1,0000
3	Способ с использованием зависимости НЧ-шума от температуры	110	$F \leq 0,45$	21, 23, 37, 53			0,7406
4	Способ с использованием показателя формы спектра НЧ-шума	110	$\gamma \leq 1,00$	14, 1, 23, 37, 53			0,6571
5	Способ с использованием НЧ-шумов и воздействия ЭСР	110	$M \leq 0,30$	21, 37, 51,53			1,0000
6	Способ с использованием НЧ-шумов и термоциклирования	110	$N \leq 1,20$	21, 37, 51,53			1,0000

Полученные коэффициенты корреляции, рассчитанные по вышеприведенным формулам, для всех рассматриваемых диагностических методов представлены в табл. 9 [7] на примере испытаний двух партий ИС типа К142ЕН5А (стабилизатор напряжения с фиксированным выходным напряжением), выпускаемых ВЗПП совместно с заводом «Транзистор» (г. Минск).

Из таблицы видно, что наибольшую корреляцию показали способы с комбинацией воздействий. Если между переменными отсутствует корреляция, на выборке одного размера почти всегда будет рассматриваться ненулевой коэффициент корреляции. Поэтому нужно провести тест на значимость. Расчет коэффициента значимости для коэффициента корреляции показал, что с достоверной вероятностью 0,95 можно сказать, что сильная корреляционная зависимость существует.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены различные способы разделения ИС по надежности с использованием только параметров НЧ-шума и с использованием параметров НЧ-шума в комбинации с различными видами воздействий.

Представленные результаты показывают, что все комбинированные диагностические методы с использованием НЧ-шумов имеют высокую достоверность, практически равную испытаниям на надежность в течение 1000 ч, что делает данные методики более привлекательными с точки зрения их применения.

Еще одним важным моментом является правильность выбора размера выборки и критерия годности. В рассматриваемых методиках критерий годности устанавливается индивидуально для каждого типа приборов на основе статистики, полученной априори на представительной выборке. В идеальном случае необходимо разработать методику определения критерия для отбраковки потенциально ненадежных приборов, обеспечивающего высокий уровень достоверности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пряников В.С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1978. 112 с.
2. Лукьянчикова Н.Б. Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Радио и связь, 1990. 225 с.
3. Нарышкин А.К., Врачев А.С. Теория низкочастотного шума. М.: Энергия, 1972. 153 с.
4. Жалуд В., Кулешов В.Н. Шумы в полупроводниковых устройствах. М.: Сов. радио, 1977. 465 с.
5. Jones B.K., Xu Y.Z. Excess Noise as an Indicator of Digital Integrated Circuit Reliability // *Microelectronic Reliability*. 1991. V. 31. No. 2/3. P. 351—361.
6. Разработка методики и аппаратуры контроля качества интегральных микросхем: отчет о НИР (заключ.): 13-63/82 / Ульянов. политехн. ин-т; рук. Афанасьев Г.Ф.; исполн.: Дулов О.А. и др. Ульяновск, 1984. 81 с. № ГР 0182.0076278. Инв. № 0285.0037307.
7. Горлов М.И., Сергеев В.А. Современные диагностические методы контроля качества и надежности полупроводниковых изделий / Под научным ред. М.И. Горлова. Ульяновск: УлГТУ, 2020. 470 с.
8. Claeys C., Simoenl E., Agopian P.G.D., Martino J.A., M. Aoulaiche, B. Cretus, Fang W., Rooyackers R., Vandooren A., Veloso A., Jurczak M., Collaertl N., Thean A. The Smaller the Noisier? Low Frequency Noise Diagnostics of Advanced Semiconductor Devices / August Conference: 2015 30-th Symposium on Microelectronics Technology and Devices (SBMicro). DOI: 10.1109/SBMicro.2015.7298104
9. Горлов М.И., Ерохин В.С., Некрасов В.А., Чернышев В.В. Характер изменения шумовых свойств интегральных схем типа ДТЛ от вида испытаний / Сб. трудов по полупроводниковым материалам, приборам и их применению. Воронеж: ВПИ, 1971. С. 182—188.
10. Некрасов В.А., Горлов М.И. Исследование шумовых свойств низкочастотного спектра ИС как одного из методов неразрушающего контроля // *Электронная техника*. 1975. Сер. 8. Вып. 1. С. 32—35.
11. Некрасов В.А., Горлов М.И., Маковий А.И., Голомедов А.В. О возможности прогнозирования потенциально ненадежных микросхем ТТЛ по шумовым критериям низкочастотного спектра // *Электронная техника*. Сер. 8. 1975. Вып. 2. С. 70—72.
12. Некрасов В.А., Горлов М.И., Дурнин И.Д. Выборочный неразрушающий контроль качества интегральных схем с ТТЛ-логикой в ходе серийного изготовления // *Электронная техника*. Сер. 8. 1977. Вып. 2. С. 66—69.
13. Гарбер Н.П., Лукьянчинова Н.Б., Абру У.Р., Жариков В.А., Кропман Д.И. Установка для измерения шумовых характеристик микросхем и дискретных транзисторов на пластинах // *Электронная промышленность*. 1991. Вып. 7. С. 27—29.
14. Горлов М.И., Жарких А.П., Емельянов А.В. Шумы полупроводниковых изделий и возможность прогнозирования их качества и надежности // *Петербургский журнал электроники*. 2005. № 1. С. 54—61.
15. Горлов М.И., Ануфриев Л.П., Жарких А.П., Смирнов Д.Ю. Влияние электростатических воздействий на интегральные схемы типа КА1034НР3 / Межв. сб. науч. трудов «Твердотельная электроника и микроэлектроника». Воронеж: ВГТУ, 2003. С. 74—78.
16. Горлов М.И., Ануфриев Л.П., Жарких А.П., Смирнов Д.Ю. Способ разделения полупроводниковых приборов по надежности / Патент РФ № 2258234. Оpubл. 10.08.2005. Бюл. № 22.

17. Горлов М.И., Жарких А.П., Шишкин И.А., Смирнов Д.Ю. Использование шумовых параметров и воздействия электростатических разрядов для разделения полупроводниковых приборов по надежности / Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах: материалы докл. науч.-техн. семинара. М.: МЭИ, 2005. С. 14—16.

18. Горлов М.И., Смирнов Д.Ю., Сегал Ю.Е., Емельянов А.В. Использование уровня шумов для контроля полупроводниковых изделий при термоциклировании // Известия вузов. Электроника. 2005. № 6. С. 89—92

19. Горлов М.И., Козьяков Н.Н., Смирнов Д.Ю. Диагностика надежности ИС по НЧ-шуму с использованием термоциклирования // Известия вузов. Электроника. 2007. № 4. С. 89—91.

20. Бордюжа О.Л. Диагностический контроль качества и надежности кремниевых биполярных интегральных схем / Дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж: ВГТУ, 1998. 163 с.

21. Горлов М.И., Смирнов Д.Ю., Козьяков Н.Н. Достоверность диагностических методов исследования на основе анализа низкочастотных шумов // Известия вузов. Электроника. 2009. № 1. С. 79—86.

22. Худсон Д. Статистика для физиков. М.: Мир, 1970. 296 с.