

РАДИАЦИОННЫЕ ШУМЫ В ТРАНЗИСТОРНЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Д. И. СВИРЯКИН

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского
института электронной интроскопии)

В блоке приемника излучения любого радиационного телевизионного интроскопа предусмотрено включение предварительного усилителя, обеспечивающего первичное усиление электрических сигналов, снимаемых с выхода преобразователя. Благодаря непосредственной близости к преобразователю, предварительный усилитель, как правило, испытывает такое же радиационное воздействие, как и преобразователь. Флуктуации выходного тока или напряжения предварительного усилителя, вызванные радиационным воздействием и обусловленные статистической природой, а также временными и пространственными изменениями потока излучения, увеличивают мощность помех в канале интроскопа и приводят к уменьшению отношения сигнал/шум, то есть к снижению чувствительности интроскопа. Поэтому для правильного подхода к вопросу выбора активных элементов для предварительных усилителей интроскопов необходимо иметь реальное представление о радиационных эффектах, которыми сопровождается облучение этих элементов, и особенно важно знать, как влияет радиация на их шумовые параметры. В силу широкого внедрения транзисторов и интегральных схем в усилительную технику целесообразно дать оценку степени воздействия потоков проникающего излучения на шум в полупроводниковых приборах, тем более, что из большого числа работ, исследовавших радиационную стойкость полупроводниковых приборов, почти нет систематизированных данных о влиянии радиации на их шумовую характеристику.

Однако в области полупроводниковых детекторов ядерных частиц существует значительное число литературных источников о взаимосвязи радиации и шума. Кроме того, многие исследователи использовали радиацию как средство для изучения шумового механизма. Вместе с тем, экспериментальные данные имеются только для нескольких моделей приборов, большинство же данных являются только приближенными и получены путем отнесения известных радиационных эффектов к известным шумовым механизмам.

Исходя из поставленной задачи, необходимо рассмотреть только те взаимосвязи, которые важны для оценки изменения шума в облученных или облучаемых приборах, поэтому в нижеприведенной таблице перечислены лишь разновидности шума транзисторов, чувствительные к радиационным эффектам и дефектам (то есть к обратимым и необратимым явлениям).

Вид прибора	Вид шума, чувствительный к радиационным дефектам		Шумы, обусловленные радиационными эффектами
	Высокие частоты	Низкие частоты	
Биполярный транзистор	Дробовой шум перехода, термический шум в базе	Фликкер-шум (или $1/f$ шум), импульсный шум	Квантовый или фототочковый шум
Плоскостной полевой транзистор с управляемым р-п-переходом	Термический шум	Генерационный шум	Квантовый или фототочковый шум
Полевой МОП-транзистор	Термический шум	Поверхностный шум	Квантовый или фототочковый шум

Шум-фактор биполярного транзистора выражается формулой [1].

$$F = 1 + \frac{kT}{R_c \cdot 2 \cdot I_k} + \frac{R_c \cdot 1 \cdot I_k}{2kT} \left[\frac{1}{h_{ст}} + \left(\frac{f}{\Delta f} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где k — постоянная Больцмана;
 T — абсолютная температура;
 R_c — выходное сопротивление источника сигнала;
 e — заряд электрона;
 J_k — постоянный ток коллектора;
 $h_{ст}$ — статистический коэффициент усиления по току;
 f — частота;
 Δf — ширина полосы пропускания.

Формула (1) показывает, что ни один параметр кроме $h_{ст}$ не зависит от радиационных повреждений и эффектов. Коэффициент $h_{ст}$ с появлением радиационных объемных и поверхностных повреждений (а следовательно с уменьшением времени жизни носителей, с накоплением центров рекомбинации носителей) уменьшается. Но изменение $h_{ст}$ заметно сказывается на величине F только при условии $R_c \neq R_{сomp}$.

$$R_{сomp} = \frac{kT}{I_k} \left[\frac{1}{h_{ст}} + \left(\frac{f}{\Delta f} \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (2)$$

При этом

$$F_{опт} = 1 + \frac{1}{(h_{ст})^{1/2}}. \quad (3)$$

Формула (1) выведена при условии $R_c > r_b$ (r_b — сопротивление базы), когда высокочастотный термический шум, связанный с сопротивлением базы, не играет существенной роли по сравнению с дробовым и может быть опущен.

Удобная формула для высокочастотного шум-фактора плоскостного полевого транзистора с управляемым р-п-переходом и для МОП-транзистора дана в [2].

$$F = 1 + \frac{g_{зи}}{G_c} + \frac{R_{ш}}{G_c} (G_c + g_{зи})^2, \quad (4)$$

где $g_{зи}$ — входная проводимость полевого транзистора;
 G_c — проводимость источника сигнала $\left(G_c = \frac{1}{R_c} \right)$;

$R_{ш} = \frac{1}{S}$ — шумовое сопротивление;

S — крутизна транзистора.

В полевых транзисторах преобладающим высокочастотным шумом является термический шум в проводящем канале, а преобладающим радиационным эффектом — рекомбинация носителей на дефектах. Поэтому радиация оказывает незначительное влияние на шумовую характеристику таких транзисторов пока не начнут изменяться S и $g_{зи}$, то есть повреждаться сами приборы. Кроме того, в МОП-транзисторах большое значение имеют поверхностные радиационные эффекты, возникновение которых связано с появлением быстрых поверхностных состояний, приводящих к уменьшению крутизны, а следовательно, к увеличению шум-фактора.

Низкочастотный шум в полевых транзисторах с р-п-переходом называется генерационным, поскольку он возникает от флуктуаций зарядов на генерационных центрах в обедненной области [3]. Этот процесс может выразиться как дополнительная компонента шумового сопротивления $R_{ш}$ и тогда

$$R_{ш} = \frac{1}{S} + BN_t, \quad (5)$$

где N_t — плотность генерационно-рекомбинационных центров, возрастающая пропорционально количеству объемных радиационных повреждений;

B — постоянный коэффициент, который определяется геометрией прибора, а также положением энергетических уровней и коэффициентом захвата генерационных центров.

Подставив (5) в формулу (4), получим полный шум-фактор полевого транзистора с р-п-переходом.

Низкочастотный шум в МОП-транзисторах обычно связывают с поверхностными эффектами, обусловленными распределением очень медленных поверхностных состояний в окиси вблизи поверхности раздела кремний — окись. Несмотря на успехи в изучении природы фликкер-шума (или $1/f$), количественное предсказание влияния радиации на этот источник шума и в настоящее время все еще невозможно [4]. В биполярных транзисторах влияние радиации на фликкер-шум еще более сложно.

Импульсный шум генерируется в момент, когда ток через радиационный дефект модулируется зарядом в генерационно-рекомбинационном центре, примыкающем к дефекту. Влияние радиации на этот шумовой механизм тоже не изучено.

Фототоковый (квантовый) шум вызван рождением избыточных носителей тока под действием гамма-квантов или электронов и может значительно превосходить дробовой шум. Число носителей, генерируемых гамма-квантом, может быть очень большим, и со статистической точки зрения эти носители генерируются вместе, а не независимо, как это имеет место в обычном дробовом шуме. Среднеквадратичный шумовой ток $\bar{i}_{ш}^2$ равен

$$\bar{i}_{ш}^2 = 2Me J_{\phi} \Delta f, \quad (6)$$

где M — среднее число носителей, генерируемых каждым падающим квантом, взаимодействующим в объеме собирания транзистора;

J_{ϕ} — первичный фототок.

Фактор M может быть оценен формулой

$$M = \frac{E_{\gamma}}{\Delta E} \cdot n_{\gamma} \cdot n_e. \quad (7)$$

где E_γ — энергия гамма-кванта;

ΔE — энергия, необходимая для генерации каждой электронно-дырочной пары (для кремния $\Delta E = 3,5$ эв);

p_γ — доля энергии, передаваемая гамма-квантом начальному электрону;

p_e — эффективность начального электрона в генерации дальнейших электронно-дырочных пар внутри активного объема транзистора.

Можно принять $p_\gamma = 1/3$ и $p_e = 0,1$. Тогда при $E_\gamma = 1$ Мэв, пользуясь формулой (7), получим $M = 10^4$ электронно-дырочных пар на гамма-квант. Фототоковый шум играет важную роль при условии

$$2eMI_\phi \geq \frac{4kT}{R_c}. \quad (8)$$

Если $R_c = 5$ ком и $M = 10^4$, тогда необходим фототок, равный только $\ln A$, чтобы увеличить шум на 3 дб.

Таким образом, при облучении транзисторов необходимо учитывать квантовые шумы, так как они могут быть преобладающими шумами в схеме усилителя. В тех случаях, когда в интроскопах используются пульсирующие источники излучения, а ширина полосы пропускания видеоканала ограничена, в выходном видеосигнале может появиться фоновая составляющая, искажающая передачу полутоновых изображений. Обусловлена фоновая составляющая интегрированием коротких электрических импульсов, возникающих при прохождении частиц или гамма-квантов через кристаллы полупроводниковых приборов, используемых в усилителях. Почти во всех практических случаях плотность потоков излучения достаточна, чтобы импульсы от отдельных квантов накладывались друг на друга и обеспечивали на выходе паразитный сигнал, представляющий собой огибающую, повторяющую форму импульса излучения. Так, например, на рис. 1 приведены осциллограммы токов коллекторного (верхняя) и эмиттерного (нижняя) переходов,

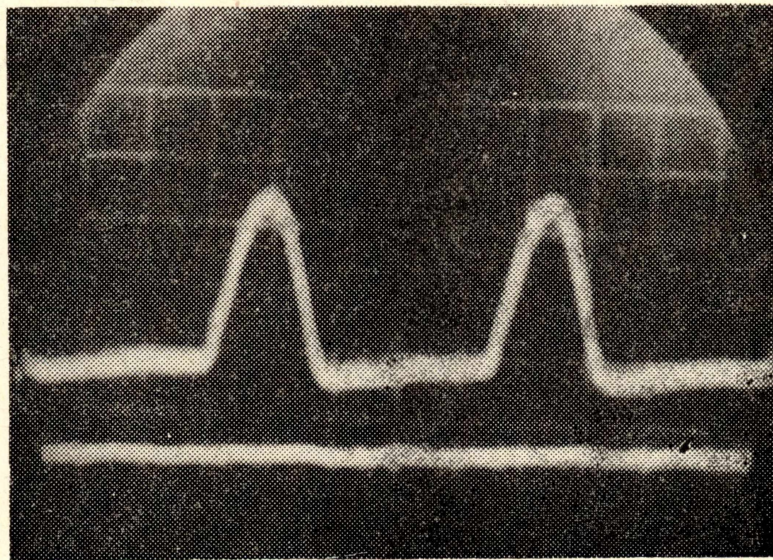


Рис. 1.

транзистора ГТ-402, вызванных рентгеновским излучением аппарата РУП-120-5 при анодном напряжении 120 кв и анодном токе 4 ма (расстояние до фокуса трубки 20 см). При выбранном режиме облучаемого транзистора ГТ-402 (напряжения эмиттер-база 0,1 в, эмиттер-коллектор 3в) и при отсутствии сигнала на входе на коллекторной нагрузке (2,2 кдм появлялся сигнал, повторяющий по форме полуволну на-

пряжения на рентгеновской трубке. Это, конечно, не означает, что при использовании источников с неизменным во времени потоком излучения квантовые шумы в цепях транзисторных усилителей уменьшатся. Как следует из вышеприведенных формул, среднеквадратичный шумовой ток останется прежним, но спектр шумов так же, как спектр излучения, изменится, но фоновая составляющая (по существу радиационная наводка) исчезнет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Thornton R. D. and atts. Characteristics and Limitations of Transistors. Chapt 4. j. Wiley 1966.
 2. Bruncke W. C. and Van der Ziel. IEEE. Trans. Electron. Dev., Vol. E. D-13, p.p. 323—329, March, 1966.
 3. Lauritzen P. O. Solid-State Electron, Vol. 8., p.p. 41—58, jan. 1965.
 4. Lauritzen P. O. IEEE Trans on Nucl. Sei., Vol. NS-19, N 2. p.p. 321—325, Apr. 1972.
-