

УДК 621.391.822 : 535.215.2

ФЛИККЕР-ШУМ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ АВТОКАТОДАХ

Р. З. Бахтизин, С. С. Гоц

Проведено экспериментальное исследование влияния состояния поверхности германиевых и кремниевых автокатодов на фликкерные флуктуации (шумы) эмиссионного тока в диапазоне частот $10-10^7$ Гц. На основе полученных результатов вводится понятие поверхностных центров эмиссии. Теоретически определена связь между структурными и временными параметрами поверхности эмиттера и спектральными характеристиками этих флуктуаций.

Относительно медленные процессы на поверхности катодов эмиссионных приборов обуславливают появление низкочастотных избыточных шумов, величина которых зависит от состояния поверхности катода и режима его работы. Поэтому исследование шумов эмиссии позволяют изучать поверхность катода и степень влияния на нее различных дестабилизирующих факторов (например адсорбции примесных атомов). Экспоненциальная зависимость автоэлектронного тока от прозрачности потенциального барьера, через который туннелируют электроны, обуславливает сильную зависимость флуктуаций тока эмиссии от процессов, происходящих в приповерхностной области автоэмиттера и на его поверхности, и, тем самым, определяет высокую чувствительность шумового метода для исследования поверхности автокатодов.

Наибольший интерес вызывают низкочастотные шумы, отражающие специфику и качество эмиттеров, а также определяющие стабильность эмиссии [1]. В подавляющем большинстве эмиссионных приборов основной компонентой низкочастотных шумов является фликкер-шум, появление которого связывается с наличием внешних и обычно неконтролируемых процессов, воздействующих на эмиссию через поверхность эмиттера, но не являющихся необходимыми для последней.

В настоящей работе приводятся результаты исследования фликкер-шумов кремниевых и германиевых фоточувствительных автоэмиттеров. Основные эксперименты выполнены на монокристаллах *p*-типа с удельным сопротивлением 14, 500, 1000, 2000 Ом·см (Si) и 30 Ом·см (Ge), поверхности которых очищались полевой десорбцией. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) таких автоэмиттеров существенно нелинейны и имеют характерную фоточувствительную область насыщения [2]. Автоэмиссионный прибор представляет собой видоизмененный полевой электронный микроскоп Мюллера с экранирующей коллектор сеткой. Исходный вакуум в приборе был не хуже 10^{-9} Тор.

При выборе методики проведения измерений шума автоэлектронной эмиссии (АЭЭ) было учтено, что шумовые токи АЭЭ имеют очень малый уровень, обусловленный малыми эмиссионными токами острых автоэмиттеров. Для измерений на частотах $10^4 \div 10^7$ Гц был использован нулевой модуляционный радиометр [3], характеризующийся высоким входным импедансом и малой эквивалентной температурой собственных шумов. На частотах $10 \div 2 \cdot 10^5$ Гц для исследования шумов использовались двухзвенный активный фильтр с высокой избира-

тельностью и анализатор спектра С4-34. Высокая токовая чувствительность на этих частотах была получена за счет применения специально разработанных предусилителей [4] с высоким входным сопротивлением (выше 10^8 Ом), входной емкостью ниже $3 \cdot 10^{-14} \text{ Ф}$, с закрытым входом и обладающих малым уровнем собственных шумов. При измерениях прибор с предусилителем помещался в магнитоэлектростатический экран.

Результаты измерений. В работе исследовались зависимости спектральной плотности мощности шума S ($S = \overline{I_{ш}^2} / \Delta f$), где $\overline{I_{ш}^2}$ — среднеквадратичное значение шумового тока, Δf — полоса пропускания измерительного прибора, от тока эмиссии I_3 и частоты f . На рис. 1 приведены типичные зависимости $S(f)$ для Si-автоэммитера, снятые на участке Фаулера — Нордгейма ВАХ при температуре $T = 300 \text{ К}$. Кривые 1—3 расположены в порядке возрастания степени покрытия катода атомами остаточных газов. Степень покрытия определялась нами через относительное уменьшение тока эмиссии на участке Фаулера — Нордгейма ВАХ; за монослой принималась предельная устойчивая концентрация адсорбата, определенная по характеру шума. Из рис. 1 видно, что более чистой поверхности катода соответствует меньший уровень избыточного шума (кривая 1). На частотах $f < 2 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ шум имеет частотную зависимость вида $1/f$. На частотах $2 \cdot 10^3 \text{ Гц} < f < 10^5 \text{ Гц}$ шум имеет частотонезависимый участок, на котором его мощность также зависит от состояния поверхности и значительно превосходит по уровню дробовой шум.

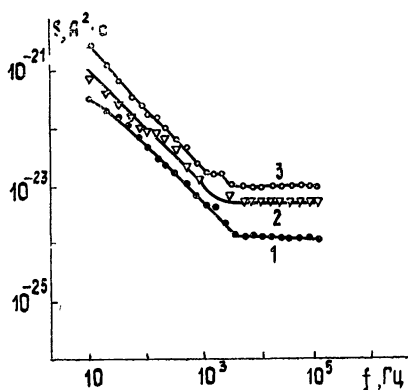


Рис. 1.

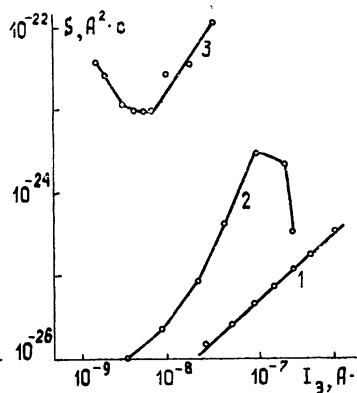


Рис. 2.

Рис 1 Спектр шума для $p\text{-Si}$ $\rho = 500 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при $T = 300 \text{ К}$: 1 — для поверхности, очищенной полевой десорбцией; 2 — для частично очищенной поверхности; 3 — для покрытия, близкого к монослойному.
Рис 2 Зависимость спектральной плотности мощности шума от тока эмиссии для $p\text{-Si}$ $\rho = 2000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при $T = 77 \text{ К}$: 1 — для середины участка фоточувствительности ВАХ на частоте 100 кГц ; 2 — для участка Фаулера — Нордгейма и переходного к области фоточувствительности участка ВАХ на частоте 100 кГц ; 3 — на участке Фаулера — Нордгейма и фоточувствительности на частоте $f = 500 \text{ Гц}$.

Наиболее характерной особенностью низкочастотного шума АЭЭ полупроводников является влияние на его характер и интенсивность участка ВАХ, на котором проводятся измерения. На рис. 2 приведены наиболее характерные зависимости спектральной плотности мощности шума от эмиссионного тока при температуре $T = 77 \text{ К}$. Для середины участка насыщения и частот $f > 10^4 \text{ Гц}$ характерна линейная зависимость мощности шума от тока эмиссии (кривая 1) и независимость S от частоты, что позволяет отнести данную компоненту к дробовому

шуму. Более сложную зависимость имеет спектральная плотность мощности шума от тока эмиссии для участка Фаулера — Нордгейма и переходной к участку насыщения области ВАХ (кривая 2). Как видно, S зависит от тока эмиссии в этом случае приблизительно по квадратичному закону при достаточно больших эмиссионных токах ($10^{-8} A \leq I_0 \leq 5 \cdot 10^{-8} A$). При переходе к участку насыщения ВАХ ($I_0 > 10^{-7} A$) уровень шума спадает до дробового. На более низких частотах ($f = 500 Гц$) для переходного от участка Фаулера — Нордгейма к области насыщения участка ВАХ характерен спад интенсивности шума с ростом эмиссионного тока (кривая 3, $10^{-9} A < I_0 < 3 \cdot 10^{-9} A$), а при дальнейшем усилении тока в области насыщения ВАХ — рост интенсивности по квадратичному закону ($I_0 > 10^{-8} A$).

Таким образом, результаты, приведенные на рис. 2 (кривые 2 и 3), показывают, что интенсивность недробовых компонент шума ослабевает при переходе от участка Фаулера — Нордгейма к области насыщения ВАХ. Этот эффект проявляется тем сильнее, чем выше частота, на которой регистрируется фликкер-шум, и чем более пологим оказывается участок насыщения ВАХ.

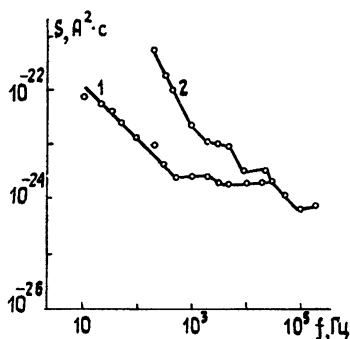


Рис. 3.

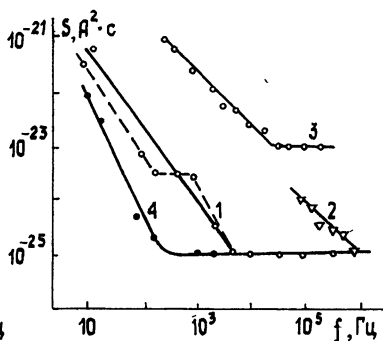


Рис. 4.

Рис 3 Спектр шума для $p\text{-Ge}$ $\rho = 30 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при $T = 77 \text{ К}$:

1 — для частично очищенной полевой десорбцией поверхности, 2 — для сильно загрязненной поверхности

Рис 4. Зависимость спектральной плотности мощности шума от частоты для $p\text{-Si}$ $\rho = 2000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$:

1 — для переходного от участка Фаулера — Нордгейма к области фоточувствительности участка ВАХ и поверхности, очищенной полевой десорбцией, 2 — для сильно загрязненной поверхности эмиттера; 3 — для частично очищенной поверхности эмиттера и больших эмиссионных токов, $I_0 \geq 2 \cdot 10^{-5} A$; 4 — для участка насыщения ВАХ и очищенной полевой десорбцией поверхности эмиттера.

Для германиевых автоэммиттеров зависимость спектральной плотности мощности шума от частоты приведена на рис. 3. Результаты получены при одном и том же значении эмиссионного тока для середины участка насыщения ВАХ и стационарной подсветке эмиттера и показывают, что спад интенсивности недробовых компонент шума с увеличением частоты неравномерен. Так, при минимально заметной адсорбции атомов остаточных газов на поверхности катода (кривая 1) на частотах $f < 5 \cdot 10^2 \text{ Гц}$ $S \sim 1/f$, а в интервалах $5 \cdot 10^2 < f < 2 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ и $3 \cdot 10^3 \text{ Гц} < f < 5 \cdot 10^4 \text{ Гц}$ спектральная плотность мощности шума практически не зависит от частоты. Для частот $f > 3 \cdot 10^4 \text{ Гц}$ S падает до уровня дробового шума. Неравномерный спад S с увеличением частоты характерен и для более сильной степени покрытия эмиттера (кривая 2).

Следует отметить влияние участка ВАХ и на качественный вид спектра шума. Для кремниевых автоэммиттеров с поверхностью, очищенной полевой десорбцией, на переходном к области насыщения участке ВАХ при температуре $T = 77 \text{ К}$ характерна зависимость спектральной плот-

ности мощности шума от частоты вида $1/f^{1.5}$ (рис. 4, кривая 1, сплошная линия). Пунктиром отмечен дифференцированный ход кривой, показывающий, что спад S с частотой происходит неравномерно. При тех же условиях на участке насыщения ВАХ зависимость $S(f)$ имеет вид $1/f^2$ (кривая 4) на частотах $f > 200$ Гц. В случае загрязненной поверхности автоэммиттера (кривая 2) при тех же токах эмиссии спектр шума имеет вид $1/f$ и наблюдается до частот 10^6 Гц, приобретая, однако, заметную нестационарность в низкочастотной области. При больших эмиссионных токах шум вида $1/f$ наблюдается до более высоких частот даже в случае частично очищенной поверхности (кривая 3, $f < 20$ кГц). Во всех случаях эффект подавления фликкер-шума на участке насыщения ВАХ на более низких частотах был выражен слабее, чем на высоких частотах (рис. 2, кривые 2 и 3; рис. 4, кривые 1 и 4).

Обсуждение. Квазистационарный характер исследованных в данной работе низкочастотных шумов свидетельствует о квазистационарности поверхностных, в частности миграционных, процессов, вызывающих эти флуктуации [5]. Связь между флуктуациями тока и миграцией атомов отмечалась ранее и в [6] для чистых вольфрамовых автоэммиттеров. На участке Фаулера — Нордгейма ВАХ подобные процессы на локальных участках поверхности катода приводят к флуктуациям эмиссионного тока. Для области насыщения ВАХ автоэлектронный ток слабо зависит от прозрачности потенциального барьера [2, 7], что и обуславливает отсутствие заметных флуктуаций тока эмиссии (рис. 2, кривые 2 и 3).

Одним из основных выводов, который следует из приведенных выше экспериментальных результатов, а также из данных работ [5, 6], является сильная зависимость величины фликкер-шума от структурных особенностей поверхности автоэммиттера, т. е. ее гетерогенности. Эта зависимость важна и интересна тем, что позволяет с помощью измерений флуктуаций эмиссионного тока провести оценку гетерогенности поверхности эмиттера путем ее моделирования. Такой подход к проблеме фликкер-шума оказался бы плодотворным в своей основе, если бы указанная модель давала достаточную информацию о структуре поверхности и не была бы сложной для математических расчетов.

При рассмотрении эмиссионных параметров катода его поверхность можно с известной точностью представить в виде N слабо взаимодействующих между собой элементарных центров эмиссии (ЦЭ), каждый из которых имеет свое определенное время жизни τ . Предположим далее, что случайное и независимое «включение» и «выключение» каждого ЦЭ и обуславливает появление избыточных низкочастотных флуктуаций. Пусть величина шума одного ЦЭ $\overline{I_{шi}^2}$ пропорциональна квадрату его тока эмиссии $\overline{I_{эi}^2}$ [8], причем все ЦЭ в момент «включения» эмиттируют одинаково. Тогда полный шум N таких ЦЭ

$$\overline{i_{ш}^2} = \overline{[i(t) - I_0]^2} = \frac{\overline{I_{шi}^2}}{N} \sim \frac{I_0^2}{N}. \quad (1)$$

Соотношение (1) получено в предположении, что значение автокорреляционной функции

$$\sum_{i \neq j} \overline{i_i i_j} - \overline{I_0^2} = 0$$

в силу статистической независимости поверхностных центров. В таком случае N может быть критерием неоднородности поверхности, причем чем более неоднородна по отношению к наблюдаемому процессу (эмиссии) поверхность, т. е. чем меньше N , тем больше оказывается величина избыточных флуктуаций.

Для получения спектральной характеристики этих избыточных флукуаций необходимо учесть временные параметры каждого ЦЭ, так как под действием процессов миграции адатомов и старения поверхности эмиссионная способность отдельных участков эмиттера меняется с некоторыми постоянными времени τ_0 . Относительно короткие τ_0 локализованы в достаточно узкой области значений, так что можно полагать $\tau_0 \approx \text{const}$. В этом случае автокорреляционная функция $K(\tau)$, согласно [9], имеет вид

$$K(\tau) = \overline{i_{\text{ш}}^2} \exp(-\tau/\tau_0) \sim (I_3^2/N) \exp(-\tau/\tau_0), \quad (2)$$

откуда, в соответствии с теоремой Винера — Хинчина, получаем для спектральной плотности мощности шума

$$S(f) \sim 2\tau_0 I_3^2/N(1 + \omega^2 \tau_0^2), \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi f$. При $\omega \ll 1/\tau_0$ выражение (3) переходит в

$$S(f) \sim I_3^2/N,$$

что реализуется в случае кремния, по данным из рис. 1, при $3 \cdot 10^3 < f < 10^5$ Гц, т. е. для быстрых поверхностных состояний с временами $\tau \leq 10^{-6}$ с [10]. При $\omega \gg 1/\tau_0$ выражение (3) можно приближенно представить в виде

$$S(f) \sim I_3^2/N f^2.$$

Такая зависимость наблюдается в случае, изображенном на рис. 4 (кривая 4).

Для медленных поверхностных состояний характерно распределение постоянных времени τ_0 в более широких пределах. Согласно работам [10, 11], нижняя граница τ_1 при этом оказывается $\sim 10^{-4}$ с, верхняя — превосходит 10^3 с, а плотность вероятности распределения τ_0 имеет вид

$$g(\tau_0) = 1/\tau_0 \ln(\tau_2/\tau_1), \quad (4)$$

где $\tau_2 \gg \tau_1$, $\tau_0 \in [\tau_2, \tau_1]$. Производя усреднение в (3) по всем τ_0 из (4), получаем

$$S(f) \sim I_3^2/N f. \quad (5)$$

Такой шум вида $1/f$ наблюдается в кремниевых автоэмиттерах для участка Фаулера — Нордгейма ВАХ (рис. 1). Из выражения (5) и данных на рис. 1 следует, что чем выше концентрация адсорбированных примесей на поверхности эмиттера, тем поверхность оказывается более неоднородной, так как концентрация поверхностных центров в этом случае будет меньше. Таким образом, минимальный уровень шума должен наблюдаться у катодов с атомарно чистой поверхностью, лишенной дефектов, что согласуется с экспериментальными результатами (рис. 1, кривая 1; рис. 4, кривая 1). Сделанные выше выводы целиком относятся и к $1/f$ -шуму в германиевых автоэмиттерах (рис. 3).

Падение уровня мощности шума при переходе от участка Фаулера — Нордгейма к участку насыщения ВАХ можно объяснить проникновением поля на большую глубину [2, 7] и увеличением числа поверхностных центров за счет приповерхностной области, что, в соответствии с (3), и приводит к снижению $S(f)$ (рис. 2, кривые 2 и 3). Поскольку при этом возрастает вероятность коротких времен релаксации τ_0 за счет их перераспределения, то, как следует из (3), $S(f)$ должна убывать с частотой быстрее, что и видно из рис. 4 (кривые 1 и 4).

Таким образом, величина и ход спектра избыточного низкочастотного шума зависит от стабильности микрорельефа автоэммитера. Наиболее же существенное влияние на микрорельеф активной части эмиттера оказывают ток эмиссии и процессы поверхностной диффузии адсорбированных частиц и дефектов, вызывающие в конечном итоге появление фликкерных флуктуаций [12].

Отмеченное выше обстоятельство весьма удовлетворительного описания полученных экспериментальных результатов с помощью соотношений (1), (3) и (5) указывает на то, что модель фликкер-шума следует строить, прежде всего, исходя из общих статистических закономерностей, а не специфических свойств изучаемого объекта. Это подтверждается также сходством в проявлении фликкер-шума в разных объектах. Например, для электрического сопротивления полупроводников соотношение (5) выполняется лишь с тем отличием, что N выражает число свободных носителей тока в проводящем слое, а I_0 — протекающий ток [13]. Кроме того, если дробовой шум обусловлен дискретностью носителей тока, то фликкер-шум отражает как дискретность, так и временные параметры системы [12]; при этом фликкер-шум может быть как поверхностным (приповерхностным), так и объемным эффектом [12–14]. Если, далее, эта дискретность сопровождается соответственно бездефектной поверхностной или объемной структурой кристалла, то число активных центров эмиссии (или число свободных носителей) N в (3) или (5) оказывается столь большим, что фликкер-шум становится сравнимым с тепловым шумом [13, 14] на частотах $f > 1 \div 10$ Гц и можно говорить о его отсутствии. Появление же дефектов и примесей и их диффузия вызывает на тех же частотах возникновение заметного избыточного шума [12, 14], что и позволяет использовать его в нашем случае для исследования поверхности автоэммитеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yamamoto Sh., Fukuhara S., Saito N., Okano H. — Surface Sci., 1976, 61, p. 535.
2. Borzyak P. G., Yatsenko A. F., Miroshnichenko L. S. — Phys. Status Solidi, 1966, 14, p. 403.
3. Бахтизин Р. З., Гоц С. С. — ПТЭ, 1978, № 5, с. 155.
4. Бахтизин Р. З., Гоц С. С. — ПТЭ, 1981, № 3, с. 136.
5. Бахтизин Р. З., Гоц С. С. — Радиотехника и электроника, 1980, 25, № 1, с. 217.
6. Swanson L. W. — Surface Sci., 1978, 70, p. 165.
7. Фурсей Г. Н., Бахтизин Р. З. — Вестник ЛГУ. Сер. Физика — Химия, 1970, № 22, с. 66.
8. Ван дер Зил А. Шумы при измерениях. — М.: Мир, 1979.
9. Робинсон Ф. Н. Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях. — М.: Атомиздат, 1980.
10. Ржанов А. В. Электронные процессы на поверхности полупроводников. — М.: Наука, 1971.
11. Ван дер Зил А. Шум (источники, описание, измерение). — М.: Сов. радио, 1973.
12. Якимов А. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 2, с. 238.
13. Kleinrenning T. G. M. — Physica, 1976, 84B, p. 353.
14. Hooge F. N. — Physica, 1976, 83B, p. 14.

Башкирский государственный университет

Поступила в редакцию
10 сентября 1980 г.

FLICKER NOISES IN SEMICONDUCTOR FIELD EMISSION CATHODES

R. Z. Bakhtizin, S. S. Gots

Experimental investigation is carried out of an influence of germanium and silicon field emission cathodes surface state on flicker fluctuations (noises) of the emission current in the frequency range 10^{-10} Hz. Based on the results obtained, a concept of surface centers of emission is introduced. A relation between structural and time parameters of the emitter surface and spectral characteristics of these fluctuations is theoretically defined.