

Найквиста формула). При комнатной темп-ре интенсивность тепловых Ф. э. остаётся постоянной до частот $f \sim 10^{12}$ Гц. Хотя тепловые Ф. э. возникают только в активных сопротивлениях, наличие в цепи реактивных элементов (конденсаторов и катушек индуктивности) может изменить частотный спектр Ф. э.

В немагнитич. проводниках Ф. э. увеличиваются за счёт медленной случайной перестройки структуры проводника под действием тока (при $f \leq 1$ кГц). Эти Ф. э. на неск. порядков превышают тепловые.

Ф. э. в эл.-вакуумных и ионных приборах связаны гл. обр. со случайным характером электронной эмиссии с катода (*дробовой шум*). Интенсивность дробовых Ф. э. практически постоянна для $f < 10^8$ Гц. Она зависит от присутствия остаточных ионов и величины пространств. заряда. Дополнит. источники Ф. э. в этих приборах — *вторичная электронная эмиссия* с анода и сеток *электронных ламп*, диодов *фотоэлектронных умножителей* и т. п., а также случайное перераспределение тока между электродами. Наблюдаются также медленные Ф. э., связанные с разл. процессами на катоде. В газоразрядных приборах низкого давления Ф. э. возникают из-за теплового движения электронов.

В *полупроводниковых приборах* Ф. э. обусловлены случайным характером процессов генерации и рекомбинации электронов и дырок (генерационно-рекомбинац. шум) и диффузии носителей заряда (диффузионный шум). Оба процесса дают вклад как в тепловой, так и в дробовой шум полупроводниковых приборов. Частотный спектр этих Ф. э. определяется временами жизни и дрейфа носителей. В полупроводниковых приборах на низких частотах наблюдаются также Ф. э., обусловленные «улавливанием» электронов и дырок дефектами кристаллич. решётки (модуляционный шум).

В приборах квантовой электроники Ф. э. ничтожно малы и обусловлены спонтанным излучением (см. *Квантовый усилитель*).

Так называемые техн. Ф. э. связаны с температурными изменениями параметров цепей и их «старением», нестабильностью источников питания, с помехами от промышл. установок, вибрацией и толчками, с нарушениями электр. контактов и т. п.

Ф. э. в *генераторах электромагнитных колебаний* вызывают модуляцию амплитуды и частоты колебаний (см. *Модулированные колебания*), что приводит к появлению непрерывного частотного спектра колебаний и к уширению спектральной линии генерируемых колебаний до $10^{-7} - 10^{-12}$ от несущей частоты.

Лит.: Бонч-Бруевич А. М., *Радиоэлектроника в экспериментальной физике*, М., 1966; Малахов А. Н., *Флуктуации в автоколебательных системах*, М., 1968; Ван дер Зил А., *Шум [в электронных приборах]*, пер. с англ., М., 1973; Суходоев И. В., *Шумы электрических цепей*, М., 1975; Рытов С. М., *Введение в статистическую радиофизику*, ч. 1, М., 1976; Робинсон Ф. Н. Х., *Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях*, пер. с англ., М., 1980. *И. Т. Трофименко.*

ФЛУКТУАЦИОННО-ДИССИПАТИВНАЯ ТЕОРЕМА — устанавливает связь между спектром флуктуаций физ. величины в равновесной диссипативной среде и её *обобщёнными восприимчивостями*, т. е. параметрами, характеризующими её реакцию на внеш. воздействие. Классич. пример Ф.-д. т. — *Найквиста формула*, связывающая спектральную мощность флуктуаций напряжения проводника, или т. н. эдс шума $\epsilon_{ш}$, с его сопротивлением R :

$$\epsilon_{ш}^2 = 4kTR\Delta f, \quad (1)$$

где Δf — полоса частот.

Соотношение (1) можно обобщить на случай любой квантовой системы. Пусть внеш. воздействие на систему описывается включением в гамильтониан возмущающего оператора:

$$\hat{V} = -\hat{x}f(t), \quad (2)$$

где \hat{x} — оператор нек-рой физ. величины, характеризующей систему, а $f(t)$ — возмущающая обобщённая сила. Тогда

обобщённая восприимчивость α вводится соотношением

$$x_{\omega} = \alpha(\omega)f_{\omega}, \quad (3)$$

связывающим фурье-компоненты силы f_{ω} и усреднённой физ. величины x_{ω} (ω — циклич. частота). Флуктуации величины x обычно характеризуются корреляц. ф-цией:

$$\phi(t-t') = \frac{1}{2} \langle \hat{x}(t)\hat{x}(t') + \hat{x}(t')\hat{x}(t) \rangle, \quad (4)$$

где скобки означают статистич. среднее от гейзенберговских операторов. Ф.-д. т. в этом случае может быть представлена в виде следующего соотношения:

$$\langle x^2 \rangle_{\omega} = h\alpha''(\omega) \text{cth}(h\omega/kT), \quad (5)$$

где $\alpha''(\omega)$ — мнимая часть обобщённой восприимчивости, а $\langle x^2 \rangle_{\omega}$ — спектральная мощность флуктуаций, фурье-компонента коррелятора (4). В основе (5) лежит принцип Онсагера, согласно к-рому как малое отклонение системы от термодинамич. равновесия, вызванное внеш. силой, так и флуктуация релаксируют к равновесию одинаковым образом (см. *Онсагера теорема*).

При отклонении системы от равновесного состояния (напр., при помещении полупроводника во внеш. эл. поле) ф-ла Найквиста нарушается. Для слабо неравновесного случая в соотношении (1) заменяют T на нек-рый параметр $T_{ш}$ — т. н. *шумовую температуру*, так что в этом случае ф-ла (1) служит определением феноменологич. параметра $T_{ш}$, являющегося удобной характеристикой флуктуаций неравновесной системы.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., *Статистическая физика*, ч. 1, 3 изд., М., 1976, гл. 12; Климонтович Ю. Л., *Статистическая физика*, М., 1982, гл. 24.

ФЛУКТУОН — составная *квазичастица*, образуемая в среде электроном, локализованным в потенц. яме, возникшей в результате флуктуации к.-л. параметра среды. В отсутствие электронов такая флуктуация приводит к возрастанию термодинамич. потенциала системы и, возникнув, через нек-рое время «рассасывается». При наличии электронов возможна стабилизация флуктуации путём захвата электрона соответствующей потенц. ямой, поскольку при локализации электрона в яме его энергия понижается (в случае кристалла это понижение энергии можно рассматривать как результат перехода электрона из зоны проводимости в локализованное состояние, расположенное в запрещённой зоне, см. *Зонная теория*). Если понижение энергии электрона при его локализации превосходит по величине повышение термодинамич. потенциала, обусловленное возникновением флуктуации, то образование флуктуации с локализованным вблизи неё электроном будет термодинамически выгодным. При определ. значениях параметров область локализации электрона (радиус Ф.) захватывает большое число атомов, так что Ф. может быть макроскопич. квазичастицей. Ф. является обобщением понятия *полярона*.

В полупроводниковых растворах (твёрдых или жидких) Ф. может образовываться вблизи области повышенной концентрации (кластера) того из компонентов, с атомами к-рого электрон сильнее взаимодействует. Возникающий кластер, состоящий преим. из атомов одного компонента, оказывается стабильным, даже если прямое взаимодействие между атомами не играет роли; атомы во флуктуонном кластере связаны силами косвенного взаимодействия, обусловленного локализованным электроном (см. *Автолокализация*).

В *магнитных полупроводниках* Ф. может быть связан с флуктуацией *намагниченности*, образуя ферромагн. область в парамагнетике или область повышенной намагниченности в ферромагнетике. При этом обменное взаимодействие электронов проводимости с электронами незаполненных оболочек магн. атомов стремится повернуть спины магн. атомов параллельно (или антипараллельно) спине автолокализованного электрона; последний, в свою очередь, находится в эфф. поле, созданном ориентирован-