УДК 378.147, 004.056

**Физические принципы работы диодных генераторов шума**

Богачев М.Г. ([maxim.b1229@gmail.com](mailto:maxim.b1229@gmail.com)), Зиборова Ю.В. ([jziborowa@gmail.com](mailto:jziborowa@gmail.com)), Харченко Е.А. ([elenakhaa@gmail.com](mailto:elenakhaa@gmail.com))

Московский политехнический университет

**Аннотация.** В статье представлен полупроводниковый генератор шума как устройство активной защиты информации от утечки по техническим каналам. Описано устройство полупроводникового диода как первичного источника шумовых помех. Объяснен физический механизм *p*-*n* перехода. Выделены основные принципы генерации радиопомех.

**Ключевые слова:** генератор шума, полупроводниковый диод, лавинно-пролетный диод, лавинный пробой, белый шум, информационная безопасность.

**Physical principle of operation of the diode noise generator**

Bogachev M.G ([maxim.b1229@gmail.com](mailto:maxim.b1229@gmail.com)), Ziborova Y.V. ([jziborowa@gmail.com](mailto:jziborowa@gmail.com)), Kharchenko E.A. ([elenakhaa@gmail.com](mailto:elenakhaa@gmail.com))

Moscow Polytechnic University

**Abstract.** In this article the noise generator is presented as an active information defence device preventing it from leaking through technical channels. The arrangement of semiconductor diode as a noise source is described. Physical mechanics of *p*-*n* junction is clarified. General principles of jam generation are distinguished.

**Keywords:** generator of noise, semiconductor diode, avalanche breakdown, white noise, IMPATT diode, information security.

**Введение.** Сегодня любая организация может стать объектом разведывательной деятельности злоумышленника или конкурента [1]. Она состоит, главным образом, в анализе информации, полученной из открытых, общедоступных, источников или несанкционированным способом. Последнему особенно способствует возможность реализации многочисленных технических каналов утечки информации.

Для противодействия такой деятельности существуют специальные технические средства. Например, генераторы шума, или «глушилки» [2]. Как правило, их размещают в непосредственной близости от работающих средств вычислительной техники или на элементах строительных конструкций (окнах, стенах, потолках и др.). Их основная задача – производить шумовые помехи (для маскировки или подавления полезных сигналов) в виде электромагнитного поля (с хаотическим изменением по случайному закону флуктуаций амплитуды, частоты и фазы), которое при необходимости может быть преобразовано в акустическое поле посредством устройства, подобного громкоговорителю.

Для корректного и эффективного использования шумового генератора необходимо соотносить характеристики вырабатываемых шумов с характеристиками маскируемых или подавляемых им сигналов (диапазоны частот должны совпадать, а спектральный уровень первых должен быть выше уровня вторых), а также – согласовывать их с условиями электромагнитной совместимости оборудования в организации. Это требует понимания физических эффектов, возникающих при функционировании полупроводниковых приборов.

**1. Общее описание диодного генератора шума.** В случае необходимости активной маскировки побочных, информативных, электромагнитных излучений и наводок средств электронно-вычислительной техники (частотный диапазон – от сотен герц до единиц гигагерц) в пространстве вокруг защищаемого объекта создают шумовое заградительное электромагнитное поле, а на отходящие цепи и инженерные коммуникации наводят маскирующие шумовые сигналы (с нормальным законом распределения вероятностей мгновенных значений, сплошным энергетическим спектром и уровнем, достаточным для исключения утечки информации) [3].

Наилучшими маскировочными свойствами обладает гладкий шум, параметры которого сохраняются примерно постоянными в широком диапазоне частот. Его также называют белым шумом ввиду сходства его частотного спектра со спектром белого света, являющегося в видимой части сплошным и равномерным. В качестве первичных источников, имитирующих белый шум, часто используют полупроводниковые диоды – стабилитроны.На рисунке 1 приведена принципиальная схема полупроводникового генератора шума [4].

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 1. Принципиальная схема полупроводникового генератора шума |

Генераторы шума применяют не только для формирования высокочастотных сигналов, но и для их усиления. На практике широкое распространение получили генераторы шума на основе лавинно-пролетных диодов, их характеризуют высокое качество шума и хорошая управляемость частотно-мощностными параметрами (0,1-340 ГГц, 6-8 Вт).

**2. Устройство полупроводникового диода.** Полупроводниковый диод является устройством, свободно пропускающим ток только в одном направлении. Он представляет собой соединение двух полупроводников – *p*- и *n*-типа – в пределах одной и той же непрерывной кристаллической решетки. Сам по себе полупроводник плохо проводит ток, поэтому в кристаллическую решетку основного материала полупроводника (чаще всего четырехвалентного кремния) добавляют примеси с большей валентностью (например, атомы пятивалентного фосфора) или меньшей валентностью (например, атомы трехвалентного бора). Этот процесс называется легированием.

В первом случае примесь называют донорной: образуется полупроводник *n*-типа, проводимость увеличивается за счет появления дополнительных свободных электронов. Во втором случае примесь называют акцепторной: образуется полупроводник *p*-типа, а проводимость увеличивается за счет появления блуждающих положительных дырок (мест отсутствия валентных электронов). В целом же полупроводник (и *p*-типа, и *n*-типа) не обладает электрическим зарядом: общее число электронов уравновешивается таким же числом протонов. Обозначения *p*- и *n*- относятся только к типу зарядов, ответственных за проводимость внутри кристалла.

Основной причиной проводимости полупроводников являются носители зарядов, намеренно введенные путем легирования, их также называют основными носителями. Но в любом полупроводнике всегда присутствуют и носители зарядов, возникающие в результате тепловых колебаний, их называют неосновными носителями. В полупроводниковых приборах поведение носителей зарядов обоих типов определяют физические эффекты, имеющие место на границе между материалами *p*- и *n*-типа – в зоне электронно-дырочного перехода, или *p*-*n* перехода.

На рисунке 2 приведены условное обозначение полупроводникового диода – *р*-*n* переход с металлическими контактами с каждой стороны (анодом и катодом) – и график изменения потенциала на *р*-*n* переходе. После образования перехода часть свободных электронов из области *n*-типа вблизи границы переходит в область *р*-типа и заполняет часть дырок в *р*-области. На месте электронов в *n*-области образуется слой с некомпенсированным положительным зарядом. Аналогично в области *р*-типа образуется отрицательный заряд. Эти заряды создают потенциальный барьер, препятствующий дальнейшему перемещению электронов через переход: скопившиеся заряды противодействуют одноименным претендентам на переход [5, 6]. Наступает равновесие, и в обедненном слое, шириной менее одного микрона, практически не остается свободных носителей зарядов.

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 2. Изменение потенциала на *p*-*n* переходе |

Если к *p*-*n* переходу подключен источник питания, то потенциальный барьер обедненного слоя увеличивается или уменьшается в зависимости от полярности поданного напряжения, или смещения (рис. 3). Когда переход смещен в прямом направлении, потенциальный барьер уменьшается и через переход течет ток, образованный основными носителями: нарушается равновесие, и часть дырок из *p*-области и электронов из *n*-области проходят сквозь обедненный слой (к соответствующим полюсам). Переходы некоторых составных полупроводников при этом излучают свет – их используют как световые индикаторы (светодиоды). В случае же обратного смещения перехода потенциальный барьер увеличивается – через переход течет лишь незначительный ток, образованный неосновными носителями обеих областей. Основное назначение диодов – выпрямление переменного тока.

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |
| Рис. 3. Поведение обедненного слоя при прямом (слева) и обратном (справа) смещениях | |

**3. Получение шумовых помех посредством диода.** При обратном смещении полупроводниковый диод ведет себя как изолятор (почти бесконечное сопротивление), но если продолжать увеличивать приложенное напряжение настанет момент, когда переход начнет резко проводить (рис. 4). Произойдет это из-за электронов теплового происхождения в обедненном слое. Под действием сильного внешнего электрического поля они приобретут достаточную кинетическую энергию для образования новых пар электрон-дырка при соударении с атомами кремния. Возникшие носители также будут участвовать в «выбивании» валентных электронов. Процесс будет развиваться лавинообразно и сопровождаться быстрым нарастанием обратного тока. Это не приведет к разрушению перехода, если не допустить его перегрева, ограничивая ток [5, 6].

|  |
| --- |
|  |
| Рис. 4. Вольт-амперная характеристика кремниевого диода |

По своей природе ионизирующие процессы, лежащие в основе явления лавинного пробоя, носят хаотичный характер, что делает использование сопутствующего шума пригодным для решения многих задач защиты информации [7].

По сути, схема генератора шума (рис. 1) представляет собой колебательный контур, в котором колебания тока поддерживаются, главным образом, системой из полупроводникового диода, подключенного в обратном смещении, и источника постоянного тока: ток диода при лавинном пробое стремится разрядить конденсатор, а источник тока наоборот – его подпитать. Также конденсатор участвует в уменьшении пульсаций высокочастотного тока в цепи, образуя вместе с резисторами резистивно-емкостной сглаживающий фильтр. Для вывода радиосигнала в открытое пространство в виде электромагнитного поля предусмотрена простейшая антенна (чем больше частота колебаний тока, тем дальше распространяется волна) [6, 8]. Возможность адаптации генератора шума под цели конкретной задачи достигается включением в его схему дополнительных элементов – модулятора и усилителя сигнала.

В общем случае в полупроводниковых приборах могут возникать шумы трех типов: дробовые шумы, тепловые шумы и шумы токораспределения и утечки. Дробовой шум образуется флуктуациями токов носителей зарядов через *p*-*n* переходы транзистора (он обладает сплошным энергетическим спектром в широком диапазоне радиочастот). Тепловые шумы возникают в результате теплового хаотического движения носителей заряда в объеме полупроводника. Шумы токораспределения являются следствием распределения тока эмиттера между базой и коллектором. Так как ток базы возникает за счет случайных рекомбинаций неосновных носителей в базе, то по своей сути он является шумовым. Избыточные шумы возникают вследствие флуктуаций генерирования и рекомбинации носителей зарядов, а шумы утечек – в результате загрязнений поверхности перехода. Коэффициент шума полупроводника зависит от его температуры и тока смещения [4].

**Заключение.** Известно, что обеспечение информационной безопасности (личности, общества, государства) требует системного подхода и осуществления комплекса многих взаимоувязанных мер – организационно-технических в частности [1]. Моделирование и выявление технических каналов утечки информации, а также разработка и эксплуатация технических средств защиты информации, невозможны без понимания физических явлений, лежащих в их основе, поскольку источники информации неизбежно взаимодействуют с объектами окружающей среды. Востребованность материала, предложенного в настоящей статье, обусловлена слабым присутствием в тематической литературе для специалистов по информационной безопасности специальных сведений по физике в доступной для понимания форме.

Предметом рассмотрения статьи являются принципы работы генераторов шума, предназначенных, главным образом, для маскировки информативных побочных электромагнитных излучений основных технических средств и систем за счет излучения в окружающее пространство флуктуационных электромагнитных волн [2]. Похожим образом устроены и генераторы шума для защиты речевой информации в выделенном или защищаемом помещении – выводящую шум антенну заменяют динамиком или виброизлучателем. Для корректного целевого использования подобных устройств необходимо понимание внутренних и внешних физических факторов, возникающих при их функционировании. Спектр применения генераторов шума в сфере информационной безопасности очень широк.

Например, к техническим средствам активной защиты информации также относят криптографические средства защиты информации (как программные, так и аппаратные). Стойкость, или надежность, современных шифров определяется секретностью ключа шифрования. В лучшем случае качественный ключ шифрования должен представлять собой последовательность истинно случайных чисел, выработать которую возможно лишь при наблюдении за физическими процессами [7, 9]. Физические генераторы случайных чисел имеют очевидную низкую производительность и требуют особых условий эксплуатации, т.к. сами продуцируют побочные информативные физические поля. Тем не менее, они находят ограниченное применение, – например, в приложениях сетевой защиты. Также интересен с практической точки зрения в контексте информационной безопасности пример использования генераторов шума в радиометрических системах с целью обнаружения скрытых объектов [10].

В целом, статья носит ознакомительный характер и может служить лишь введением в заданную предметную область.

**Список использованной литературы**

1. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации: указ Президента России от 05.12.2016 № 646 // Российская газета [Электронный ресурс]. – URL: https://rg.ru/2016/12/06/doktrina-infobezobasnost-site-dok.html (дата обращения: 20.02.2019).
2. Сахнин А.А. Техника комплексного технического контроля радиоэлектронных средств. – М.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 240 с.
3. Иванов В.П. Транзисторные генераторы шума для устройств радиомаскировки ПЭМИН // Специальная техника. 2017. № 1. С. 23-29.
4. Палий А.И. Радиоэлектронная борьба. – М.: Воениздат, 1981. – 320 с.
5. Джонс М.Х. Электроника – практический курс. – М.: Постмаркет, 1999. – 528 с.
6. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики: в 2 т. Т. 1. – М.: Лаборатория знаний, 2017. – 542 с.
7. Шнайер Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си. – М.: Триумф, 2013. – 816 с.
8. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики: в 2 т. Т. 2. – М.: Лаборатория знаний, 2017. – 606 с.
9. Соболь И.М. Метод Монте-Карло. – М.: Наука, 1985. – 80 с.
10. Ивашов С.И., Бугаев А.С. Использование генераторов шума в радиометрических системах для обнаружения скрытых объектов // Радиотехника и электроника. М: Российская академия наук, 2013. № 9 (58). С. 935-942.