

УДК 538.9

© Б. И. Якубович

ГЕНЕРАЦИОННО-РЕКОМБИНАЦИОННЫЙ ШУМ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Рассмотрен шум в полупроводниках, вызванный генерационно-рекомбинационными процессами через разрешенные уровни в запрещенной зоне. Дано количественное описание шума. Вычислен спектр генерационно-рекомбинационного шума в весьма общем случае. Полученные результаты могут быть применены при разработке полупроводниковых приборов для снижения шума и улучшения характеристик приборов.

Кл. сл.: шум, флуктуации, полупроводники, полупроводниковые приборы

ВВЕДЕНИЕ

Генерационно-рекомбинационный шум обусловлен спонтанными флуктуациями скоростей генерации и рекомбинации носителей заряда. Генерационно-рекомбинационный шум наблюдается в полупроводниках различных типов и многочисленных полупроводниковых приборах. В его основе лежат флуктуации концентрации свободных носителей заряда, вызываемые флуктуациями скоростей процессов генерации и рекомбинации. Шум данного типа может вызываться как прямой генерацией-рекомбинацией (через запрещенную зону), так и генерационно-рекомбинационными процессами через разрешенные уровни в запрещенной зоне, образованные дефектами структуры, иначе говоря, генерационно-рекомбинационными процессами через ловушки. Шум, вызванный прямыми генерационно-рекомбинационными процессами, существенен в основном для материалов с узкой запрещенной зоной и низкой концентрацией дефектов, образующих разрешенные уровни в запрещенной зоне. В большей части случаев генерационно-рекомбинационный шум обусловлен процессами на ловушечных центрах. Это связано с тем, что для генерации и рекомбинации носителей через разрешенные уровни в запрещенной зоне требуется меньше энергии, чем для прямых генерационно-рекомбинационных процессов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Развитие представлений о генерационно-рекомбинационном шуме во многом связано со степенью общности решаемых задач в данном направлении. Исторически первое решение задачи

о генерационно-рекомбинационном шуме было получено Бернамонтом [1], который предполагал, что отдельные носители заряда являются независимыми. Позднее было показано, что, вообще говоря, отдельные носители нельзя считать независимыми. Более полное представление о генерационно-рекомбинационном шуме дает теория, развитая Берджесом [2, 3]. Предложенная им модель является более строгой, отдельные носители не считаются независимыми, однако и в этой модели делаются определенные предположения. В более поздних работах наиболее принципиальные результаты, развивающие представления о генерационно-рекомбинационном шуме, были связаны с рассмотрением флуктуаций, вызванных несколькими типами генерационно-рекомбинационных центров [4, 5]. Обзоры исследований генерационно-рекомбинационного шума приведены в [6–8].

Генерационно-рекомбинационный шум является одним из наиболее важных типов электрических шумов. Он дает значительный, а нередко определяющий вклад в электрический шум многочисленных полупроводников и полупроводниковых приборов. Он влияет на работу и ограничивает параметры многих полупроводниковых приборов. Поэтому изучение генерационно-рекомбинационного шума необходимо для снижения его уровня и обеспечения надежности электронных приборов. В связи с этим целесообразно развитие более полных и общих представлений об этом типе шума. Как уже отмечалось выше, в большей части случаев генерационно-рекомбинационный шум связан с процессами на ловушечных центрах, образованных дефектами структуры. Поэтому рассмотрим генерационно-рекомбинационный шум, вызванный ловушками, в более общем виде.

ГЕНЕРАЦИОННО-РЕКОМБИНАЦИОННЫЙ ШУМ

Генерационно-рекомбинационный шум, связанный с ловушками, возникает вследствие флуктуаций концентрации свободных носителей заряда в полупроводнике, вызванных генерационно-рекомбинационными процессами через ловушки. Считаем, что носители захватываются и испускаются ловушками, которые могут быть образованы различными типами дефектов. Концентрации носителей и дефектов находятся в произвольном соотношении. Анализируемый флуктуационный процесс считаем стационарным. Рассматривается типичная ситуация, когда флуктуации определяются носителями одного типа. Очевидно, что флуктуации концентрации носителей определяются флуктуациями их числа в образце. Вероятность изменения числа свободных носителей в полупроводнике, вызываемого захватом и эмиссией носителей на ловушках, статистически связана с числами свободных и захваченных носителей и пустых ловушек в данный момент. Поскольку число свободных носителей в отсутствие захватов на ловушки и число ловушек фиксированы, то в любой момент времени число свободных носителей полностью определяет количество захваченных носителей и пустых ловушек. Таким образом, анализируем флуктуационный процесс, когда вероятность изменения числа свободных носителей статистически связана с числом свободных носителей в данный момент. Рассматриваемые флуктуации, вызванные стохастическим процессом изменения числа N свободных носителей, представляют собой случайную последовательность прямоугольных импульсов, амплитуда которых δN определяется выражением $\delta N = N - \langle N \rangle$, а длительность очередного импульса равна промежутку времени между последовательными событиями изменения числа свободных носителей в образце, вызываемыми захватом и эмиссией носителей на ловушках. При указанных выше статистических связях рассматриваемого флуктуационного процесса длительность импульса статистически связана с его амплитудой, а амплитуда импульса статистически связана с амплитудой предшествовавшего импульса. Случайные последовательности импульсов со статистически связанными параметрами импульсов неоднократно анализировались автором [8, 9].

Вычислим спектр флуктуаций числа свободных носителей в полупроводниках. Флуктуации числа свободных носителей можно записать следующим образом:

$$\delta N = \sum_{j=1}^n \delta N_j x(t - \tau_1 \dots - \tau_{j-1}, \tau_j), \quad (1)$$

где n — число импульсов в последовательности продолжительностью T ; $x(t)$ — функция, описывающая форму импульса; δN_j — амплитуда, τ_j — длительность импульса. Преобразование Фурье имеет вид:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^n \delta N_j (t - \tau_1 \dots - \tau_{j-1}, \tau_j) e^{-2\pi i f t} dt = \sum_{j=1}^n \delta N_j e^{-2\pi i f (\tau_1 + \dots + \tau_{j-1})} F_0(f, \tau_j), \quad (2)$$

где

$$F_0(f, \tau_j) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t, \tau_j) e^{-2\pi i f t} dt. \quad (3)$$

Соответственно

$$|F(f)|^2 = \sum_{j=1}^n \delta N_j |F_0(f, \tau_j)|^2 + 2 \operatorname{Re} \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^{n-j} \left\{ \delta N_j \delta N_{j+i} e^{2\pi i f (\tau_j + \dots + \tau_{j+i})} \times F_0(f, \tau_j) F_0^*(f, \tau_{j+i}) \right\}. \quad (4)$$

Рассчитываем среднее по ансамблю $\langle |F(f)|^2 \rangle$, используя независимость ряда параметров в рассматриваемой последовательности импульсов:

$$\begin{aligned} \langle |F(f)|^2 \rangle &= \sum_{j=1}^n \left\langle \delta N_j^2 |F_0(f, \tau_j)|^2 \right\rangle + \\ &+ 2 \operatorname{Re} \sum_{j=1}^{n-1} \left\langle \delta N_j \delta N_{j+1} e^{2\pi i f \tau_j} F_0(f, \tau_j) F_0^*(f, \tau_{j+1}) \right\rangle + \\ &+ 2 \operatorname{Re} \sum_{j=1}^{n-2} \sum_{i=2}^{n-j} \left\langle \delta N_j e^{2\pi i f \tau_j} F_0(f, \tau_j) \right\rangle \times \\ &\quad \times \left\langle \delta N_{j+i} F_0^*(f, \tau_{j+i}) \right\rangle \times \\ &\quad \times \left\langle e^{2\pi i f \tau_{j+1}} \right\rangle \dots \left\langle e^{2\pi i f \tau_{j+i-1}} \right\rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

Вычисляем спектральную плотность флуктуаций числа свободных носителей, учитывая стационарность рассматриваемого стохастического процесса, и получаем следующее выражение:

$$S_N(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\langle |F(f)|^2 \rangle}{T} = \nu \left[\left\langle \delta N^2 |F_0(f, \tau)|^2 \right\rangle + 2 \operatorname{Re} \left\langle \delta N_j \delta N_{j+1} e^{2\pi i f \tau_j} F_0(f, \tau_j) F_0^*(f, \tau_{j+1}) \right\rangle + \right.$$

$$+2 \operatorname{Re} \left\langle \delta N F_0^*(f, \tau) \right\rangle \left\langle \delta N e^{\pi i f \tau} F_0(f, \tau) \right\rangle \frac{\langle e^{2\pi i f \tau} \rangle}{1 - \langle e^{2\pi i f \tau} \rangle} \Bigg]. \quad (6)$$

Здесь $\nu = \lim_{T \rightarrow \infty} n / T$ — средняя частота изменений числа свободных носителей. Очевидно, что $\nu = 1 / \langle \tau \rangle$.

Вычислим преобразование Фурье одиночного импульса, учитывая, что импульсы прямоугольной формы:

$$F_0(f, \tau) = \int_0^\tau x(t) e^{-2\pi i f t} dt = \frac{e^{-\pi i f \tau} \sin \pi f \tau}{\pi f}. \quad (7)$$

Из (6) и (7) находим выражение для спектра флуктуаций числа свободных носителей в полупроводниках:

$$S_N(f) = \frac{1}{\pi^2 f^2 \langle \tau \rangle} \left[\langle \delta N^2 \sin^2 \pi f \tau \rangle + 2 \operatorname{Re} \left\langle \delta N_j \delta N_{j+1} e^{\pi i f (\tau_j + \tau_{j+1})} \sin \pi f \tau_j \sin \pi f \tau_{j+1} \right\rangle + 2 \operatorname{Re} \left\langle \delta N e^{\pi i f \tau} \sin \pi f \tau \right\rangle^2 \frac{\langle e^{2\pi i f \tau} \rangle}{1 - \langle e^{2\pi i f \tau} \rangle} \right]. \quad (8)$$

Полученное выражение определяет спектр генерационно-рекомбинационного шума, вызванного генерационно-рекомбинационными процессами через разрешенные уровни в запрещенной зоне, образованные дефектами структуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дано описание генерационно-рекомбинационного шума в полупроводниках, вызванного ловушками, в весьма общем виде. Оно справедливо при произвольном соотношении концентраций ловушек и свободных носителей. Статистические связи между последовательными изменениями числа свободных носителей в полупроводнике, обусловленными генерационно-рекомбинационными процессами, заданы в общем виде. Вычислено выражение общего вида для спектра генерационно-рекомбинационного шума. Оно может быть использовано для описания и анализа шума в многочисленных полупроводниковых материалах. Для определенных характеристик материала, параметров образца и заданного характера статистических связей между событиями флуктуацион-

ного процесса подстановка соответствующих плотностей распределений в общую формулу (8) позволяет легко получить выражение для спектра флуктуаций. Полученные результаты могут быть применены при разработке полупроводниковых приборов: для снижения шума и улучшения характеристик приборов. Результаты работы могут быть использованы для флуктуационной спектроскопии полупроводников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bernamont J.* Fluctuations de potential aux bornes d'un conducteur metallique de faible volume parcouru par un courant // *Ann. Phys.* 1937. V. 7. P. 71–140.
2. *Burgess R.E.* Fluctuations in the number of charge carriers in a semiconductor // *Physica.* 1954. V. 20, N 7-12. P. 1007–1010.
3. *Burgess R.E.* The statistics of charge carrier fluctuations in semiconductors // *Proc. Phys. Soc. B.* 1956. V. 69, N 10. P. 1020–1027.
4. *Van Rheezen A.D., Bosman G., van Vliet C.M.* Decomposition of generation-recombination noise spectra in separate Lorentzians // *Solid State Electron.* 1985. V. 28, N 5. P. 457–463.
5. *Hooge F.N., Ren L.* On the variances of generation-recombination noise in a three-level system // *Physica B.* 1994. V. 193, N 1. P. 31–38.
6. *Bonani F., Chione G.* Noise in semiconductor devices, modeling and simulation. Berlin: Springer-Verlag, 2001. 212 p.
7. *Якубович Б.И.* Электрические флуктуации в металлах. СПб.: Энергоатомиздат, 1999. 208 с.
8. *Якубович Б.И.* Электрические флуктуации в твердых телах. Germany: AV Akademikerverlag, 2013. 212 с.
9. *Якубович Б.И.* Электрический шум и дефекты структуры твердых тел. Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 116 с.

Петербургский институт ядерной физики, Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", г. Гатчина, Ленинградская обл.

Контакты: *Якубович Борис Иосифович,*
yakubovich@pnpi.spb.ru

Материал поступил в редакцию 14.06.2013

GENERATION-RECOMBINATION NOISE IN THE SEMICONDUCTORS**B. I. Yakubovich***Petersburg nuclear physics institute, Gatchina, Leningrad district.*

Generation-recombination noise in the semiconductors, caused by generation-recombination processes through the allowed levels in the forbidden band is considered. The quantitative description of noise is given. The spectrum of generation-recombination noise in general case is calculated. The obtained results can be applied for development of semiconductor devices: for decrease of noise and improvement of characteristics of devices.

Keywords: noise, fluctuations, semiconductors, semiconductor devices