Общая физика

УДК 538.9

Электрические флуктуации и нарушения структуры твердых тел

Б. И. Якубович

Проанализированы электрические флуктуации в твердых телах, вызванные дефектами структуры с внутренними степенями свободы. Дано количественное описание флуктуаций. Вычислено выражение общего вида для спектра флуктуаций. Полученные результаты могут быть применены для анализа флуктуаций в твердых материалах и снижения шума в электронных приборах.

PACS: 72.70.+m
Ключевые слова: флуктуации, шум, дефекты, твердые тела.

Введение

Одной из наиболее значительных причин электрических флуктуаций в твердых телах является захват носителей заряда дефектами структуры. В большой степени с этим механизмом связывают происхождение широко распространенных типов электрических шумов, а именно, избыточного [1], генерационно-рекомбинационного [2], взрывного [3]. Шумы этих типов обычно доминируют в области низких частот, причем наиболее часто преобладает избыточный шум.

Обзоры исследований электрических флуктуаций сделаны в [4–6]. Шумы отмеченных типов ограничивают параметры электронных приборов. Это, в первую очередь, оказывает влияние на работу приемных и измерительных устройств. В дополнение к результатам традиционного изучения шумов представляется принципиальным рассмотреть флуктуации, вызываемые дефектами с внутренними степенями свободы. Такие дефекты могут находиться в нескольких состояниях (положениях). Физические причины, реализующие существование таких дефектов, детально рассмотрены в [7].

Особенности формирования флуктуаций, обусловленных дефектами с внутренними степенями свободы, связаны со следующими обстоятельствами. Дефект имеет набор состояний, в каждом из которых он может находиться. При этом процесс изменений состояния дефекта является стохастическим. Переход дефекта из одного состояния в другое приводит к изменению его характеристик, в т.ч. влияющих на процессы захвата и эмиссии носителей заряда. Это, в свою очередь, влияет на статистические характеристики и спектральные свойства флуктуаций.

Целью данной статьи является анализ электрических флуктуаций, вызванных дефектами с внутренними степенями свободы.

Теоретический анализ

Флуктуации, вызванные захватом и эмиссией носителей заряда дефектами структуры, во многих случаях определяют уровень и свойства электрического шума твердых тел в области низких частот. Особенно велика роль данного механизма в полупроводниках. Поэтому подробно проанализируем электрические флуктуации в полупроводниках, обусловленные захватом и эмиссией носителей заряда дефектами с внутренними степенями свободы. Такие дефекты обладают набором возможных состояний. Процесс их изменений носит стохастический характер. Переход дефекта из одного состояния в другое приводит к изменению его характеристик, влияющих на процессы захвата и эмиссии носителей.

Далее рассматриваем ситуацию, когда время между переходами дефекта много больше времен, связанных с захватом и эмиссией носителя дефектом. Тогда каждому состоянию дефекта соответствуют характерные времена нахождения дефекта с захваченным носителем и без него. Для того чтобы дать описание флуктуаций, вызванных дефектами различного происхождения и обладающих разными статистическими свойствами, рассмотрим весьма общий случай. Считаем, что распределение вероятностей нахождения дефекта

Якубович Борис Иосифович, ст. научн. сотрудник.
Петербургский институт ядерной физики, НИЦ «Курчатовский институт».
Россия, 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща.
Тел.: 8 1371–4–64–92. E-mail: yakubovich@pnpi.spb.ru

Статья поступила в редакцию 19 марта 2014 г.

© Якубович Б.И., 2014

по возможным состояниям задано в общем виде. Плотности вероятностей распределения времен нахождения дефекта с захваченным носителем τ и без него θ для каждого состояния дефекта тоже заданы в общем виде: $u_l(\tau)$ и $w_l(\theta)$, где $l = 1\ldots k$, k – число состояний. Вычислим спектр электрических флуктуаций. При этом считаем, что захват и эмиссия носителей различными дефектами независимы друг от друга и рассматриваемый флуктуационный процесс стационарный.

Вычисляем спектр флуктуаций, вызываемых дефектом в полупроводнике. Захват дефектом носителя заряда приводит к изменению тока на величину q/τ_0, где q – заряд носителя, τ_0 – время дрейфа носителя через образец. Средний ток в образце определяется величинами тока при захваченном дефектом носителе и при отсутствии такого, а также распределением вероятностей состояний дефекта и распределениями вероятностей времен τ и θ. Очевидно, что при захваченном носителе ток меньше среднего значения на величину $\dfrac{q\langle\theta\rangle}{\tau_0(\langle\tau\rangle+\langle\theta\rangle)}$, в противном случае ток больше среднего значения на $\dfrac{q\langle\tau\rangle}{\tau_0(\langle\tau\rangle+\langle\theta\rangle)}$. Здесь $\langle\tau\rangle=\sum_{l=1}^{k}p_l\int_0^\infty \tau u_l(\tau)d\tau$, $\langle\theta\rangle=\sum_{l=1}^{k}p_l\int_0^\infty \theta w_l(\theta)d\theta$ и p_l – вероятность нахождения дефекта в состоянии l. Флуктуации тока представляют собой случайную последовательность импульсов. Импульс процесса с длительностью $\tau+\theta$ имеет вид:

$$x(t)=\begin{cases}-\dfrac{q}{\tau_0}\dfrac{\langle\theta\rangle}{\langle\tau\rangle+\langle\theta\rangle}, & 0<t<\tau\\ \dfrac{q}{\tau_0}\dfrac{\langle\tau\rangle}{\langle\tau\rangle+\langle\theta\rangle}, & \tau<t<\tau+\theta\end{cases}, \tag{1}$$

и флуктуации тока выражаются следующим образом:

$$\delta I(t)=\sum_{j=1}^{n}x(t-\tau_1-\theta_1\ldots-\tau_{j-1}-\theta_{j-1},\tau_j+\theta_j), \tag{2}$$

где n – число импульсов в последовательности продолжительностью T. Преобразование Фурье имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}F(f)&=\int_{-\infty}^{\infty}\delta I(t)e^{-2\pi ift}dt=\\&=\sum_{j=1}^{n}e^{-2\pi if(\tau_1+\theta_1+\ldots\tau_{i-1}+\theta_{j-1})}F_0(f,\tau_j+\theta_j),\end{aligned} \tag{3}$$

где

$$F_0(f,\tau_j+\theta_j)=\int_{-\infty}^{\infty}x(t,\tau_j+\theta_j)e^{-2\pi ift}dt. \tag{4}$$

Тогда

$$\begin{aligned}|F(f)|^2&=\sum_{j=1}^{n}\left|F_0(f,\tau_j+\theta_j)\right|^2+\\&+2\mathrm{Re}\sum_{j=1}^{n-1}\sum_{i=1}^{n-j}e^{2\pi if(\tau_j+\theta_j+\ldots\tau_{j+i-1}+\theta_{j+i-1})}\times\\&\times F_0(f,\tau_j+\theta_j)F_0^*(f,\tau_{j+i}+\theta_{j+i}).\end{aligned} \tag{5}$$

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

$$\begin{aligned}\langle|F(f)|^2\rangle&=\sum_{j=1}^{n}\langle|F_0(f,\tau_j+\theta_j)^2|\rangle+\\&+2\mathrm{Re}\sum_{j=1}^{n-1}\sum_{i=1}^{n-j}\langle F_0^*(f,\tau_{j+i}+\theta_{j+i})\rangle\times\\&\times\langle F_0(f,\tau_j+\theta_j)e^{2\pi if(\tau_j+\theta_j)}\rangle\times\\&\times\langle e^{2\pi if(\tau_{j+1}+\theta_{j+1})}\rangle\ldots\langle e^{2\pi if(\tau_{j+i-1}+\theta_{j+i-1})}\rangle.\end{aligned} \tag{6}$$

Вычисляем спектральную плотность рассматриваемого стохастического процесса, учитывая его стационарность:

$$\begin{aligned}S(f)&=\lim_{T\to\infty}\frac{\langle|F(f)|^2\rangle}{T}=\nu(\langle|F_0(f,\tau+\theta)|^2\rangle+\\&+2\mathrm{Re}\frac{\langle F_0^*(f,\tau+\theta)\rangle\langle F_0(f,\tau+\theta)e^{2\pi if(\tau+\theta)}\rangle}{1-\langle e^{2\pi if(\tau+\theta)}\rangle}),\end{aligned} \tag{7}$$

где $\nu=\lim_{T\to\infty}\dfrac{n}{T}$ – среднее число носителей, захватываемых дефектом в единицу времени. Очевидно, что $\nu=\dfrac{1}{\langle\tau\rangle+\langle\theta\rangle}$. Вычислим преобразование Фурье одиночного импульса $F_0(f,\tau+\theta)$:

$$\begin{aligned}F_0(f,\tau+\theta)&=\int_{-\infty}^{\infty}x(t,\tau+\theta)e^{-2\pi ift}dt=\frac{q}{\tau_0}\frac{1}{\langle\tau\rangle+\langle\theta\rangle}\times\\&\times(-\langle\theta\rangle\int_0^{\tau}e^{-2\pi ift}dt+\langle\tau\rangle\int_{\tau}^{\tau+\theta}e^{-2\pi ift}dt)=\frac{1}{2\pi if}\frac{q}{\tau_0}\frac{1}{\langle\tau\rangle+\langle\theta\rangle}\times\\&\times((\langle\tau\rangle+\langle\theta\rangle)e^{-2\pi if\tau}-\langle\tau\rangle e^{-2\pi if(\tau+\theta)}-\langle\theta\rangle).\end{aligned} \tag{8}$$

Далее находим $\langle|F_0(f,\tau+\theta)|^2\rangle$, $\langle F_0^*(f,\tau+\theta)\rangle$, $\langle F_0(f,\tau+\theta)e^{2\pi if(\tau+\theta)}\rangle$ и получаем выражение для спектра электрических флуктуаций:

$$S(f)=\frac{\nu q^2}{\tau_0^2}[D+2\mathrm{Re}\frac{\Phi\Psi}{1-\varphi}], \tag{9}$$

$$\nu=\frac{1}{\sum_{l=1}^{k}p_l(\int_0^\infty\tau u_l(\tau)d\tau+\int_0^\infty\theta w_l(\theta)d\theta)}, \tag{10}$$

$$\begin{aligned}D=&\frac{1}{2\pi^2f^2[\sum_{l=1}^{k}p_l(\int_0^\infty\tau u_l(\tau)d\tau+\int_0^\infty\theta w_l(\theta)d\theta)]^2}\times\\&\times\{[\sum_{l=1}^{k}p_l\int_0^\infty\tau u_l(\tau)d\tau]^2+[\sum_{l=1}^{k}p_l\int_0^\infty\theta w_l(\theta)d\theta]^2+\\&+\sum_{l=1}^{k}p_l\int_0^\infty\tau u_l(\tau)d\tau\sum_{l=1}^{k}p_l\int_0^\infty\theta w_l(\theta)d\theta\times\\&\times[1+\sum_{l=1}^{k}p_l\int_0^\infty\int_0^\infty\cos2\pi f(\tau+\theta)\cdot u_l(\tau)w_l(\theta)d\tau d\theta]-\\&-\sum_{l=1}^{k}p_l(\int_0^\infty\tau u_l(\tau)d\tau+\int_0^\infty\theta w_l(\theta)d\theta)[\sum_{l=1}^{k}p_l\int_0^\infty\tau u_l(\tau)d\tau\times\\&\times\sum_{l=1}^{k}p_l\int_0^\infty\cos2\pi f\theta\cdot w_l(\theta)d\theta+\sum_{l=1}^{k}p_l\int_0^\infty\theta w_l(\theta)d\theta\times\\&\times\sum_{l=1}^{k}p_l\int_0^\infty\cos2\pi f\tau\cdot u_l(\tau)d\tau]\},\end{aligned} \tag{11}$$

$$\Phi = \frac{1}{2\pi f \sum_{l=1}^{k} p_l (\int_0^\infty \tau u_l(\tau) d\tau + \int_0^\infty \theta w_l(\theta) d\theta)} \times$$
$$\times [\sum_{l=1}^{k} p_l (\int_0^\infty \tau u_l(\tau) d\tau + \int_0^\infty \theta w_l(\theta) d\theta) \sum_{l=1}^{k} p_l \int_0^\infty e^{2\pi i f \tau} u_l(\tau) d\tau -$$
$$- \sum_{l=1}^{k} p_l \int_0^\infty \tau u_l(\tau) d\tau \sum_{l=1}^{k} p_l \int_0^\infty \int_0^\infty e^{2\pi i f (\tau+\theta)} u_l(\tau) w_l(\theta) d\tau d\theta -$$
$$- \sum_{l=1}^{k} p_l \int_0^\infty \theta w_l(\theta) d\theta], \quad (12)$$

$$\Psi = \frac{1}{2\pi f \sum_{l=1}^{k} p_l (\int_0^\infty \tau u_l(\tau) d\tau + \int_0^\infty \theta w_l(\theta) d\theta)} \times$$
$$\times [\sum_{l=1}^{k} p_l (\int_0^\infty \tau u_l(\tau) d\tau + \int_0^\infty \theta w_l(\theta) d\theta) \sum_{l=1}^{k} p_l \int_0^\infty e^{2\pi i f \theta} w_l(\theta) d\theta -$$
$$- \sum_{l=1}^{k} p_l \int_0^\infty \theta w_l(\theta) d\theta \sum_{l=1}^{k} p_l \int_0^\infty \int_0^\infty e^{2\pi i f (\tau+\theta)} u_l(\tau) w_l(\theta) d\tau d\theta -$$
$$- \sum_{l=1}^{k} p_l \int_0^\infty \tau u_l(\tau) d\tau], \quad (13)$$

$$\varphi = \sum_{l=1}^{k} p_l \int_0^\infty \int_0^\infty e^{2\pi i f (\tau+\theta)} u_l(\tau) w_l(\theta) d\tau d\theta. \quad (14)$$

Поскольку процессы на различных дефектах независимы, спектр электрических флуктуаций в образце определяется суммой спектров, создаваемых отдельными дефектами.

Заключение

Дано количественное описание электрических флуктуаций, связанных с нарушениями структуры твердых тел. Полученные формулы (9) – (14) дают выражение общего вида для спектра электрических флуктуаций, вызванных захватом и эмиссией носителей заряда дефектами с внутренними степенями свободы. Данное выражение получено при заданных в общем виде распределении вероятностей нахождения дефекта по возможным состояниям и распределениях времен дефекта, имеющего захваченный носитель и не захватившего носитель, для каждого состояния.

Формулы (9) – (14) описывают электрические флуктуации в многочисленных типах полупроводников, вызванные дефектами с внутренними степенями свободы, обладающими разнообразными статистическими свойствами. Результаты работы могут быть использованы для анализа флуктуаций в твердых телах и снижения шума в электронных приборах.

Литература

1. *Kirton M.J., Uren M.J.*// Adv. Phys. 1989. V. 38. No. 4. P. 367.
2. *Vandamme L.K.J.*// IEEE Trans. Electron Devices. 1994. V. 41. No. 11. P. 2176.
3. *Kleinpenning T.G.M.*// *Physica B.* 1990. V. 164. No. 3. P. 331.
4. *Якубович Б.И.* Электрические флуктуации в неметаллах.— СПб.: Энергоатомиздат, 1999.
5. *Якубович Б.И. Электрический шум и дефекты структуры твердых тел.— Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012.*
6. *Якубович Б.И.* Электрические флуктуации в твердых телах.— Germany: AV Akademikerverlag, 2013.
7. *Ланно М., Бургуэн Ж. Точечные дефекты в полупроводниках. Теория.— М.: Мир, 1984.*

Electric fluctuations and structural imperfections of solid

B. I. Yakubovich

Petersburg Nuclear Physics Institute
Gatchina, Leningrad district, 188300, Russia.
E-mail: yakubovich@pnpi.spb.ru

Received March 19, 2014

Electric fluctuations in solids, caused by defects of structure with internal degrees of freedom, are analysed. The quantitative description of fluctuations is given. Expression of general form for spectrum of fluctuations is calculated. The obtained results can be applied to the analysis of fluctuations in solid materials and decrease of noise in electronic devices.

PACS: 72.70.+m
Keywords: fluctuations, noise, defects, solids.

References

1. M. J. Kirton and M. J. Uren, Adv. Phys., **38**, 367 (1989).

2. L. K. J. Vandamme, IEEE Trans. Electron Devices **41**, 2176. (1994)

3. T. G. M. Kleinpenning, Physica B **164**, 331 (1990).

4. B. I. Yakubovich, *Electric Fluctuations in Nonmetals* (Energoatomizdat, St. Petersburg, 1999) [in Russian].

5. B. I. Yakubovich, Electric Noise and Defects of Solid State Structure (Germany, LAP Lambert Academic Publishing, 2012).

6. B. I. Yakubovich, *Electric Fluctuations in Solids* (Germany, AV Akademikerverlag, 2013).

7. M. Lannoo and J. Bourgoin, Point Defects in Semiconductors. Theoretical Aspects (Sptinger-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1981; Mir, Moscow 1984).