

Общая физика

УДК 538.9

Электрические флуктуации и многозарядные ловушки в полупроводниках

Б. И. Якубович

Рассмотрены вопросы формирования электрических флуктуаций в полупроводниках многозарядными ловушками, образованными дефектами структуры. Проанализированы флуктуации, связанные с дефектами структуры различных типов. Вычислено выражение общего вида для спектра флуктуаций, вызванных многозарядной ловушкой. Дано количественное описание электрических флуктуаций в полупроводниках, обусловленных группой многозарядных ловушек.

PACS: 72.70+m

Ключевые слова: флуктуации, шум, спектры, ловушки, полупроводники, твердые тела, полупроводниковые приборы.

Введение

Одной из наиболее значительных причин возникновения электрических флуктуаций в полупроводниках является захват носителей заряда ловушками, образованными дефектами структуры. Флуктуации числа свободных носителей, возникающие вследствие захвата и эмиссии носителей ловушками, приводят к флуктуациям проводимости полупроводника, которые вызывают электрический шум. Электрический шум, вызванный этой причиной, широко исследуется в многочисленных полупроводниковых материалах. Обзоры таких исследований приведены в [1—6]. При этом, как правило, рассматриваются флуктуации, обусловленные однозарядными ловушками. Однако флуктуационные процессы в полупроводниках, связанные с захватом свободных носителей заряда ловушками, не исчерпываются только переходом носителей в связанные состояния на однозарядные ловушки. Возможен также захват свободных носителей на многозарядные ловушки, которые могут быть образованы разными типами структурных дефектов и имеют место в разнообразных полупроводниковых материалах. Многозарядные ловушки могут захватывать несколько носителей

заряда, и, соответственно, флуктуационные процессы, связанные с ними, могут существенно отличаться от флуктуационных процессов, обусловленных однозарядными ловушками.

Целью данной работы являлось подробное рассмотрение флуктуационных процессов в полупроводниках, вызванных многозарядными ловушками, и определение соответствующих спектров флуктуаций.

Постановка задачи

Проанализируем электрические флуктуации в полупроводниках, вызванные захватом свободных носителей на многозарядные ловушки. При реалистических концентрациях дефектов в твердых телах процессы захвата и эмиссии на различных ловушках не оказывают непосредственного влияния друг на друга. Рассматриваем характерную ситуацию, когда число свободных носителей заряда много больше числа носителей, которые могут быть захвачены на многозарядные ловушки. Тогда процессы захвата и эмиссии носителей на различных ловушках в полупроводниках независимы друг от друга, так как флуктуации числа свободных носителей в образце малые. Вследствие независимости процессов на ловушках спектр флуктуаций числа свободных носителей в образце равен сумме спектров, создаваемых отдельными ловушками. Для определенности считаем, что флуктуации обусловлены одним типом носителей.

Рассмотрим флуктуации числа свободных носителей в полупроводниках, вызванные одной многозарядной ловушкой, при постоянном электрическом поле, приложенном к образцу. рассмат-

Якубович Борис Исифович, старший научный сотрудник. Петербургский институт ядерной физики. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». Россия, 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роша. Тел. 81371-4-64-92. E-mail: yakubovich@pnpi.spb.ru

Статья поступила в редакцию 10 октября 2014 г.

© Якубович Б. И., 2014

риваемый флуктуационный процесс считаем стационарным. Анализируем весьма общий случай стохастического процесса захвата и эмиссии носителей ловушкой, когда вероятность очередного события данного процесса (изменения числа носителей на ловушке в результате захвата или эмиссии) статистически связана с предыдущим событием и не зависит от предшествующих, при произвольном характере статистических связей. Вызываемые многозарядной ловушкой флуктуации числа свободных носителей представляют собой случайную последовательность прямоугольных импульсов, амплитуда которых n определяется выражением $n = \langle N \rangle - N$ (N — число носителей, захваченных на ловушку), а длительность очередного импульса равна промежутку времени между последовательными событиями процесса захвата и освобождения носителей на ловушке. При указанных выше статистических связях рассматриваемого флуктуационного процесса длительность импульса статистически связана с его амплитудой, а амплитуда импульса статистически связана с амплитудой предшествующего импульса. Вычислим спектр флуктуаций числа свободных носителей в полупроводнике, вызванных многозарядными ловушками.

Теоретический анализ

Многозарядная ловушка, которая имеет возможность захватить k носителей заряда, может быть незаполненной или заполненной 1, 2, ..., k носителями. Обозначим P_0, P_1, \dots, P_k — вероятности нахождения ловушки в состояниях с 0, 1, ..., k захваченными носителями. Флуктуации числа свободных носителей в этих состояниях, соответственно,

$$n_0 = \langle N \rangle \quad n_1 = \langle N \rangle - 1 \dots \quad n_k = \langle N \rangle - k, \quad (1)$$

где

$$\langle N \rangle = \sum_{i=0}^k P_i i. \quad (2)$$

Флуктуации числа свободных носителей в образце — случайная последовательность импульсов прямоугольной формы, которая может быть записана в следующей форме:

$$n = \sum_{j=1}^l n_j x(t - \tau_1 \dots - \tau_{j-1}, \tau_j), \quad (3)$$

где l — число импульсов в последовательности продолжительностью T , $x(t)$ — функция, описывающая форму импульса, n_j — амплитуда, τ_j — длительность импульса.

Вычислим спектр флуктуаций числа свободных носителей. Преобразование Фурье случайной последовательности импульсов имеет вид

$$\begin{aligned} F(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^l n_j x(t - \tau_1 \dots - \tau_{j-1}, \tau_j) e^{-2\pi i f t} dt = \\ &= \sum_{j=1}^l n_j e^{-2\pi i f (\tau_1 + \dots + \tau_{j-1})} F_0(f, \tau_j), \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$F_0(f, \tau_j) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t, \tau_j) e^{-2\pi i f t} dt. \quad (5)$$

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

$$\begin{aligned} \langle |F(f)|^2 \rangle &= \sum_{j=1}^l \langle n_j^2 |F_0(f, \tau_j)|^2 \rangle + \\ &+ 2 \operatorname{Re} \sum_{j=1}^{l-1} \langle n_j n_{j+1} e^{2\pi i f \tau_j} F_0(f, \tau_j) F_0^*(f, \tau_{j+1}) \rangle + \\ &+ 2 \operatorname{Re} \sum_{j=1}^{l-2} \sum_{i=2}^{l-j} \langle n_j e^{2\pi i f \tau_j} F_0(f, \tau_j) \rangle \times \\ &\times \langle n_{j+i} F_0^*(f, \tau_{j+i}) \rangle \langle e^{2\pi i f \tau_{j+1}} \rangle \dots \langle e^{2\pi i f \tau_{j+i-1}} \rangle. \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая стационарность рассматриваемого стохастического процесса, вычисляем спектральную плотность флуктуаций числа свободных носителей:

$$\begin{aligned} S_N(f) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\langle |F(f)|^2 \rangle}{T} = \nu \{ \langle n^2 |F_0(f, \tau)|^2 \rangle + \\ &+ 2 \operatorname{Re} \langle n_j n_{j+1} e^{2\pi i f \tau_j} F_0(f, \tau_j) F_0^*(f, \tau_{j+1}) \rangle + \\ &+ 2 \operatorname{Re} \langle n F_0^*(f, \tau) \rangle \frac{\langle n e^{2\pi i f \tau} F_0(f, \tau) \rangle \langle e^{2\pi i f \tau} \rangle}{1 - \langle e^{2\pi i f \tau} \rangle} \}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\nu = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{l}{T}$ — среднее число захватов и освобождений носителей на многозарядной ловушке в единицу времени, $F_0(f, \tau)$ — преобразование Фурье одиночного импульса, которое с учетом прямоугольной формы импульса имеет вид:

$$F_0(f, \tau) = \int_0^{\tau} x(t) e^{-2\pi i f t} dt = \frac{e^{-\pi i f \tau} \sin \pi f \tau}{\pi f}. \quad (8)$$

Подставляя данное соотношение в выражение (7) и, учитывая, что $\nu = 1 / \langle \tau \rangle$, получаем итоговую формулу для спектра флуктуаций числа свобод-

ных носителей заряда в полупроводниках, вызванных многозарядной ловушкой:

$$S_N(f) = \frac{1}{\pi^2 f^2 \langle \tau \rangle} \{ \langle n^2 \sin^2 \pi f \tau \rangle + 2 \operatorname{Re} \langle n_j n_{j+1} e^{\pi i f (\tau_j + \tau_{j+1})} \sin \pi f \tau_j \sin \pi f \tau_{j+1} \rangle + 2 \operatorname{Re} \frac{\langle n e^{\pi i f \tau} \sin \pi f \tau \rangle^2 \langle e^{2 \pi i f \tau} \rangle}{1 - \langle e^{2 \pi i f \tau} \rangle} \}. \quad (9)$$

Так как проанализированы процессы захвата и эмиссии носителей на ловушках при произвольных статистических связях между последовательными событиями процесса, то закон распределения времен между последовательными событиями и амплитуд импульсов, вызванных захватом и эмиссией носителей, задан в общем виде. Поскольку процессы захвата и эмиссии носителей на различных ловушках независимы друг от друга, спектр флуктуаций, обусловленных группой многозарядных ловушек, определяется суммой спектров, создаваемых каждой ловушкой.

Захват носителя на ловушку вызывает изменение тока, протекающего в образце, на величину q/τ_d (здесь q — заряд носителя, τ_d — время дрейфа носителя через образец). Вследствие этого в рассматриваемой ситуации спектр флуктуаций тока связан со спектром флуктуаций числа свободных носителей следующим образом:

$$S_I(f) = \frac{q^2}{\tau_d^2} S_N(f). \quad (10)$$

Соответственно, спектр флуктуаций тока, вызванных многозарядной ловушкой, имеет вид:

$$S_I(f) = \frac{q^2}{\pi^2 f^2 \tau_d^2 \langle \tau \rangle} \{ \langle n^2 \sin^2 \pi f \tau \rangle + 2 \operatorname{Re} \langle n_j n_{j+1} e^{\pi i f (\tau_j + \tau_{j+1})} \sin \pi f \tau_j \sin \pi f \tau_{j+1} \rangle + 2 \operatorname{Re} \frac{\langle n e^{\pi i f \tau} \sin \pi f \tau \rangle^2 \langle e^{2 \pi i f \tau} \rangle}{1 - \langle e^{2 \pi i f \tau} \rangle} \}. \quad (11)$$

Определим спектр флуктуаций тока, вызванных захватом свободных носителей многозарядными ловушками, имеющимися в образце. Введем обозначения n_{ij} и τ_{ij} для, соответственно, амплитуды и длительности текущего импульса j , создаваемого ловушкой с номером i , и обозначим k^1 число ловушек. Спектр флуктуаций тока представляет собой сумму спектров, создаваемых отдельными ловушками, вследствие статистической независимости процессов захвата и эмиссии носителей на различных ловушках. Проведя необходимое суммирование, получаем итоговое выражение для спектра флуктуаций:

$$S_I(f) = \frac{q^2}{\pi^2 f^2 \tau_d^2} \sum_{i=1}^{k^1} \frac{1}{\langle \tau_i \rangle} \{ \langle n_i^2 \sin^2 \pi f \tau_i \rangle + 2 \operatorname{Re} \langle n_{ij} n_{ij+1} e^{\pi i f (\tau_{ij} + \tau_{ij+1})} \sin \pi f \tau_{ij} \sin \pi f \tau_{ij+1} \rangle + 2 \operatorname{Re} \frac{\langle n_i e^{\pi i f \tau_i} \sin \pi f \tau_i \rangle^2 \langle e^{2 \pi i f \tau_i} \rangle}{1 - \langle e^{2 \pi i f \tau_i} \rangle} \}. \quad (12)$$

В результате, получена формула общего вида для спектра токового шума в полупроводниках, вызываемого набором многозарядных ловушек.

Заключение

Проанализированы в весьма общем случае флуктуации, возникающие в полупроводниках, вследствие процессов захвата и освобождения носителей заряда на многозарядных ловушках. Проведенное рассмотрение справедливо для многозарядных ловушек, образованных любыми типами структурных дефектов. При этом проанализированы стохастические процессы захвата и эмиссии носителей на ловушках с плотностями распределений параметров, заданными в общем виде. Полученные формулы для флуктуаций в полупроводниках носят общий характер. Подстановка в них конкретных плотностей распределений параметров позволяет легко определить виды спектров флуктуаций в представляющих интерес частных случаях.

Полученные результаты развивают количественное описание флуктуаций, вызываемых захватом носителей заряда дефектами структуры полупроводников. Ранее обычно рассматривались флуктуации, связанные с однозарядными ловушками. Вычисленные в статье выражения дают строгое описание флуктуаций, вызываемых многозарядными ловушками, и в совокупности с имевшимися ранее данными позволяют дать более полное описание флуктуаций, обусловленных захватом носителей различными типами структурных дефектов. Полученные результаты могут быть использованы для оценки шума в полупроводниковых материалах и улучшения характеристик полупроводниковых приборов.

Литература

1. Kirton M. J., Uren M. J. // J. Adv. Phys. 1989. V. 38. No. 4. P. 367.
2. Jones B. K. // Adv. Electron. Electron. Phys. 1993. V. 87. P. 201.
3. Якубович Б. И. Электрические флуктуации в неметаллах. — СПб.: Энергоатомиздат, 1999.
4. Якубович Б. И. Электрический шум и дефекты структуры твердых тел. — Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012.

5. Якубович Б. И. Электрические флуктуации в твердых телах. — Germany: AV Akademikerverlag, 2013.

6. Якубович Б. И. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 259.

Electrical fluctuations and multicharge traps in semiconductors

B. I. Yakubovich

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

Received October 10, 2014

Questions of formation of electric fluctuations in semiconductors by multicharge traps, caused by defects of structure, are considered. Analyzed are fluctuations, connected to defects of structure of various types. Expression of general form for spectrum of the fluctuations, caused by a multicharge trap, is calculated. The quantitative description of electrical fluctuations in the semiconductors, caused by group of multicharge traps, is given.

PACS: 72.70.+m

Keywords: fluctuations, noise, spectra, traps, semiconductors, solids, semiconductor devices.

References

1. M. J. Kirton and M. J. Uren, *J. Adv. Phys.* **38**, P. 367 (1989).
2. B. K. Jones, *Adv. Electron. Electron. Phys.* **87**, 201 (1993).
3. B. I. Yakubovich, *Electrical Fluctuations in Nonmetals* (Energoatomizdat, St. Petersburg, 1999) [in Russian].
4. B. I. Yakubovich, *Electrical Noise and Structural Defects of Solids* (Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012).
5. B. I. Yakubovich, *Electrical Fluctuations in Solids* (Germany: AV Akademikerverlag, 2013).
6. B. I. Yakubovich, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 259 (2013).