

УДК 538.9

PACS: 72.70+m

Влияние проникающих излучений на электрический низкочастотный шум полупроводников

Б. И. Якубович

Изучено влияние проникающих излучений на электрический низкочастотный шум полупроводников. Получены формулы для определения количества дефектов структуры в полупроводниках, возникающих вследствие воздействия проникающего излучения. Получено выражение общего вида для спектра электрического низкочастотного шума в полупроводниках при воздействии на них проникающего излучения. Установлена количественная связь спектра электрического низкочастотного шума с развитием нарушений структуры полупроводников, вызванных проникающими излучениями. Полученные результаты могут быть использованы для определения спектров электрического шума в полупроводниках различных типов и в многочисленных полупроводниковых приборах. Вычисленные выражения позволяют провести оценки интенсивности электрического низкочастотного шума, из которых могут быть сделаны выводы о возможности функционирования и надежности полупроводниковых приборов. Установленная связь электрического шума с радиационными дефектами может быть использована для оценки по спектральным характеристикам шума дефектности структуры полупроводников, подвергавшихся радиационным повреждениям.

Ключевые слова: шум, флуктуации, электрический, проникающее излучение, полупроводники, твердые тела.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-3-181-186

Введение

В электрический шум полупроводников на низких частотах основной вклад обычно дает избыточный низкочастотный

шум. Спектральная плотность шума данного типа возрастает с понижением частоты ($S(f) \sim 1/f$). Избыточный шум, как правило, доминирует над другими типами электрических шумов в полупроводниках в низкочастотной области. Избыточный шум существенно ограничивает параметры многих электронных приборов и влияет на чувствительность приемных и измерительных устройств.

Многочисленные исследования показывают, что избыточный шум в полупроводниках связан с дефектами структуры [1–6]. При этом происхождение избыточного шума в полупроводниках обычно

Якубович Борис Иосифович, с.н.с., к.ф.-м.н.
Петербургский институт ядерной физики
им. Б. П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».
Россия, 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина,
мкр. Орлова роща, 1.
E-mail yakubovich_bi@pnpi.nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 25 марта 2021 г.

© Якубович Б. И., 2021

связывается с захватом и эмиссией носителей заряда ловушками, образованными дефектами структуры [1, 4, 5, 7–10]. Отметим, что происхождение избыточного шума, обусловленное дефектами, позволяет использовать его для оценки качества полупроводниковых материалов и надежности полупроводниковых приборов [4, 7, 10]. Воздействие проникающих излучений увеличивает количество дефектов в твердых материалах.

В настоящее время нередко возникает необходимость обеспечения безотказной работы электронной аппаратуры, находящейся под воздействием проникающих излучений: в условиях космической радиации, вблизи ядерных реакторов и в ряде других ситуаций. Отказы могут быть связаны как с увеличением дефектности материалов приборов, вызванных радиацией, так и с выходом параметров приборов за пределы допустимых значений, на что в большой степени могут влиять электрические шумы. В связи с указанными выше причинами целесообразно изучить влияние проникающих излучений на избыточный шум полупроводников.

Цель работы: изучение влияния проникающих излучений на избыточный шум полупроводников и вычисление спектра избыточного шума при воздействии проникающих излучений на полупроводник.

Теоретический анализ

Электрический шум в полупроводниках на низких частотах обычно определяется избыточным шумом. Основной причиной избыточного шума в полупроводниках является захват и эмиссия носителей заряда ловушками, образованными дефектами структуры. Т. е. избыточный шум непосредственно связан с дефектами структуры полупроводника. Воздействие проникающих излучений на твердые тела увеличивает количество дефектов структуры в них.

Выясним влияние проникающих излу-

чений на избыточный шум в полупроводниках. Вычислим спектр избыточного шума при воздействии проникающих излучений на полупроводник. Для этого определим количество дефектов в полупроводнике, подверженном воздействию проникающих излучений. В полупроводнике при воздействии проникающих излучений возрастает количество дефектов с увеличением времени. При этом, вообще говоря, возможны события возникновения и уничтожения дефектов. Т. е. под влиянием проникающих излучений в полупроводнике протекает случайный процесс изменения числа дефектов, приводящих к образованию ловушек. Такой случайный процесс может принимать только неотрицательные значения. Изменения этого процесса могут происходить в любой момент времени t , при этом в любой момент времени он может или увеличиться на единицу, или уменьшиться на единицу, или остаться неизменным. Стохастический процесс такого типа описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова [11]:

$$\begin{aligned} \frac{dp_0(t)}{dt} &= u_1(t)p_1(t) - w_0(t)p_0(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= w_0(t)p_0(t) + u_2(t)p_2(t) - \\ &- (w_1(t) + u_1(t))p_1(t) \\ &\dots\dots\dots (1) \\ \frac{dp_i(t)}{dt} &= w_{i-1}(t)p_{i-1}(t) + u_{i+1}(t)p_{i+1}(t) - \\ &- (w_i(t) + u_i(t))p_i(t) \\ &\dots\dots\dots \\ &(i = 1, 2, 3\dots), \end{aligned}$$

здесь $p_i(t)$ – вероятность числа i дефектов структуры в момент времени t , $w_i(t)$ – интенсивности потоков событий, ведущих к увеличению числа дефектов, $u_i(t)$ – интенсивности потоков событий, ведущих к уменьшению числа дефектов. Найдем среднее число дефектов $N_d(t)$ в момент времени t . Сделаем это следующим обра-

зом. Умножим левую и правую часть i -го уравнения системы (1) на величину i :

$$\begin{aligned} \frac{dp_1(t)}{dt} &= w_0(t)p_0(t) + u_2(t)p_2(t) - \\ &- (w_1(t) + u_1(t))p_1(t) \\ \dots\dots\dots & \\ i \frac{dp_i(t)}{dt} &= iw_{i-1}(t)p_{i-1}(t) + iu_{i+1}(t)p_{i+1}(t) - \\ &- i(w_i(t) + u_i(t))p_i(t). \\ \dots\dots\dots & \end{aligned} \quad (2)$$

Сложим левые и правые части полученных уравнений:

$$\sum_{i=1}^{\infty} i \frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{i=1}^{\infty} [iw_{i-1}(t)p_{i-1}(t) + iu_{i+1}(t)p_{i+1}(t) - i(w_i(t) + u_i(t))p_i(t)]. \quad (3)$$

Преобразуем левую часть уравнения:

$$\sum_{i=1}^{\infty} i \frac{dp_i(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^{\infty} ip_i(t) = \frac{d}{dt} N_d(t). \quad (4)$$

Учтем следующие соотношения:

$$\sum_{i=1}^{\infty} iw_{i-1}p_{i-1}(t) = \sum_{i=0}^{\infty} (i+1)w_i(t)p_i(t), \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} iu_{i+1}(t)p_{i+1}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} (i-1)u_i(t)p_i(t). \quad (6)$$

В результате получаем:

$$\frac{dN_d(t)}{dt} = \sum_{i=0}^{\infty} (w_i(t) - u_i(t))p_i(t). \quad (7)$$

Поскольку в реальных ситуациях количество дефектов много меньше количества атомов в полупроводнике, то выполняется соотношение $w_i(t) = w(t)$, означающее, что скорость образования дефектов зависит от времени и не зависит от числа дефектов, имеющих в данный момент. Так как количество дефектов много меньше количества атомов в полупро-

воднике, то дефекты не оказывают взаимного влияния друг на друга, и, следовательно, выполняется соотношение $u_i(t) = u(t)$, где $u(t)$ – интенсивность потока событий для одного дефекта, причем величина $u(t)$ обычно достаточно мала. С учетом этого:

$$\sum_{i=0}^{\infty} w_i(t)p_i(t) = w(t) \sum_{i=0}^{\infty} p_i(t) = w(t), \quad (8)$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} u_i(t)p_i(t) = u(t) \sum_{i=0}^{\infty} ip_i(t) = u(t)N_d(t). \quad (9)$$

В итоге находим уравнение для $N_d(t)$:

$$\frac{dN_d(t)}{dt} = w(t) - u(t)N_d(t). \quad (10)$$

Его решение при начальном условии $N_d(0)$ имеет вид:

$$N_d(t) = e^{-\int_0^t u(\theta)d\theta} \left[\int_0^t w(x)e^{\int_0^x u(\theta)d\theta} dx + N_d(0) \right]. \quad (11)$$

В большинстве случаев и в наиболее характерных ситуациях интенсивность проникающего излучения можно считать постоянной. Тогда $w(t)$ можно считать не зависящим от времени. В реальных ситуациях вероятность аннигиляции дефекта не зависит от времени, и, следовательно, $u(t)$ постоянно. В результате приходим к уравнению:

$$\frac{dN_d(t)}{dt} = w - uN_d(t). \quad (12)$$

Его решение:

$$N_d(t) = \frac{w}{u}(1 - e^{-ut}) + N_d(0)e^{-ut}. \quad (13)$$

Уравнение (13) определяет количество дефектов в полупроводнике, находящемся

под воздействием проникающего излучения.

В работах [5, 8] автором вычислено выражение общего вида для спектра элект-

рического шума в полупроводниках, вызванного захватом и эмиссией носителей заряда ловушками, образованными дефектами структуры. Оно имеет вид:

$$\frac{S_I(f)}{I^2} = \frac{N_d \sigma v}{NV \left(1 + \frac{1}{g} e^{-\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)} \right)} \Phi(f), \quad (14)$$

где

$$\Phi(f) = \varphi(f) + \text{Re} \psi(f), \quad (15)$$

$$\varphi(f) = \frac{1}{2\pi^2 f^2 (\langle \tau \rangle + \langle \theta \rangle)^2} [\langle \theta \rangle^2 (1 - \langle \cos 2\pi f \tau \rangle) - \langle \tau \rangle \langle \theta \rangle (\langle \cos 2\pi f \tau \rangle + \langle \cos 2\pi f \theta \rangle - \langle \cos 2\pi f (\tau + \theta) \rangle) - 1] + \langle \tau \rangle^2 (1 - \langle \cos 2\pi f \theta \rangle), \quad (16)$$

$$\psi(f) = \frac{1}{2\pi^2 f^2 (\langle \tau \rangle + \langle \theta \rangle)^2 (1 - \langle e^{2\pi i f (\tau + \theta)} \rangle)} [\langle \theta \rangle (\langle e^{2\pi i f \tau} \rangle - 1) - \langle \tau \rangle (\langle e^{2\pi i f (\tau + \theta)} \rangle - \langle e^{2\pi i f \tau} \rangle)] [\langle \theta \rangle (\langle e^{2\pi i f \theta} \rangle - \langle e^{2\pi i f (\tau + \theta)} \rangle) - \langle \tau \rangle (1 - \langle e^{2\pi i f \theta} \rangle)]. \quad (17)$$

Здесь N_d – количество ловушек в образце, σ – эффективное сечение захвата ловушки, v – средняя скорость теплового движения носителей, N – количество свободных носителей в образце, V – объем образца, E – энергетический уровень ловушки, E_F – уровень Ферми, g – фактор вырождения, k – постоянная Больцмана, T – температура, τ и θ – времена нахождения ловушки соответственно в заполненном и свободном состояниях. Распределения $U(\tau)$ и $W(\theta)$ заданы в общем виде.

Из формул (13) и (14) находим выражение для спектра электрического низкочастотного шума в полупроводнике, находящемся под воздействием проникающего излучения:

$$\frac{S_I(f)}{I^2} = \left[\frac{w}{u} (1 - e^{-ut}) + N_d(0) e^{-ut} \right] \times \frac{\sigma v}{NV \left(1 + \frac{1}{g} e^{-\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)} \right)} \Phi(f). \quad (18)$$

При очень большом времени облучения ($t \rightarrow \infty$) получим следующее выражение для спектра шума:

$$\frac{S_I(f)}{I^2} = \frac{w}{u} \frac{\sigma v}{NV \left(1 + \frac{1}{g} e^{-\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)} \right)} \Phi(f). \quad (19)$$

В результате получена формула (18) для спектра электрического низкочастотного шума, вызванного захватом и эмиссией носителей заряда дефектами в полупроводнике, находящемся под воздействием проникающего излучения. Из него следует связь спектральной плотности шума с характеристиками процесса изменения числа дефектов в полупроводнике, вызванного воздействием проникающего излучения. Таким образом, установлено влияние проникающего излучения на электрический низкочастотный шум полупроводников. Дано количественное описание электрического низкочастотного шума, вызванного дефектами в полупроводниках, подвергающихся облучению. Вычис-

ленное выражение (18) общего вида может применяться для различных типов полупроводников.

Заключение

Изучено влияние проникающих излучений на избыточный низкочастотный шум полупроводников. Определено увеличение количества дефектов структуры в полупроводнике вследствие воздействия проникающих излучений. Вычислено выражение для спектра избыточного шума при воздействии проникающего излучения на полупроводник. Установлена количественная связь спектра электрического низкочастотного шума с развитием нарушений структуры полупроводников, вызванных проникающими излучениями. Полученные результаты могут быть использованы для определения спектров избыточного шума в полупроводниках различных типов и в многочисленных полупроводниковых приборах. Результаты статьи могут иметь прикладное применение. Вычисленные выражения позволяют сделать оценки интенсивности низкочастотного шума, из которых могут быть сделаны выводы о возможности функционирования и надежности полупроводниковых

приборов. Установленная связь электрического шума с радиационными дефектами может быть использована для оценки по спектральным характеристикам шума дефектности структуры полупроводников, подвергавшихся радиационным повреждениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kirton M. J., Uren M. J. // J. Adv. Phys. 1989. Vol. 38. No. 4. P. 367.
2. Fleetwood D. M. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2015. Vol. 62. No. 4. P. 1462.
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 флуктуационные явления в твердых телах. – Riga: SIA OmniScriptum Publishing, 2018.
6. Якубович Б. И. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 2. С. 127.
7. Jones B. K. // Adv. Electron. Electron. Phys. 1993. Vol. 87. P. 201.
8. Якубович Б. И. Электрические флуктуации в твердых телах. – Germany: AV Akademikerverlag, 2013.
9. Якубович Б. И. // Прикладная физика и математика. 2019. № 8. С. 3.
10. Якубович Б. И. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2020. Т. 25. № 3. С. 65.
11. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Том 1. – М.: Мир, 1984.

PACS: 72.70+m

Influence of penetrating radiations on electrical low frequency noise of semiconductors

B. I. Yakubovich

B. P. Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute of NRC «Kurchatov Institute»
1 mkr. Orlova roshcha, Gatchina, Leningrad district, 188300, Russia
E-mail: yakubovich_bi@pnpi.nrcki.ru

Received March 25, 2021

The influence of penetrating radiations on the electrical low-frequency noise of semiconductors is studied. Expression is calculated that determines the number

of structural defects in semiconductors arising from exposure to penetrating radiation. General form expression is calculated for the spectrum of electrical low-frequency noise in semiconductors when exposed to penetrating radiation. Quantitative relationship was established between the spectrum of electrical low-frequency noise and the development of disturbances in the structure of semiconductors caused by penetrating radiations. The results obtained can be used to determine the spectra of electrical noise in semiconductors of various types and in numerous semiconductor devices. The results of the article have practical applications. Calculated expressions allow to make estimates of the intensity of electrical low-frequency noise, from which conclusions can be drawn about possibility of functioning and reliability of semiconductor devices. Established relationship between electrical noise and radiation defects can be used to estimate, based on spectral characteristics of the noise, the defectiveness of structure of semiconductors subjected to radiation damage.

Keywords: noise, fluctuations, electrical, penetrating radiation, semiconductors, solids.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-3-181-186

REFERENCES

1. M. J. Kirton and M. J. Uren, *J. Adv. Phys.* **38**, 367 (1989).
2. D. M. Fleetwood, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **62**, 1462 (2015).
3. B. I. Yakubovich, *Electrical fluctuations in nonmetals* (Energoatomizdat, St. Petersburg, 1999) [in Russian].
4. B. I. Yakubovich, *Electrical noise and structural defects in solids* (LAP Lambert Academic Publishing, Germany, 2012).
5. B. I. Yakubovich, *Electric fluctuation phenomena in solids* (SIA OmniScriptum Publishing, Riga, 2018).
6. B. I. Yakubovich, *Usp. Prikl. Fiz.* **4** (2), 127 (2016).
7. B. K. Jones, *Adv. Electron. Electron. Phys.* **87**, 201 (1993).
8. B. I. Yakubovich, *Electrical fluctuations in solids* (AV Akademikerverlag, Germany, 2013).
9. B. I. Yakubovich, *Prikladnaya fizika i matematika*, No. 8, 3 (2019).
10. B. I. Yakubovich, *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* **25** (3), 65 (2020).
11. W. Feller, *An Introduction to Probability Theory and its Applications, Vol. 1* (Wiley, New York, 1968; Mir, Moscow, 1984).