



УДК 620.1.08
doi: 10.21685/2587-7704-2023-8-1-4



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Методы измерения параметров полупроводниковых материалов

Диана Евгеньевна Тузова

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
diana.tuzova.02@bk.ru

Екатерина Анатольевна Печерская

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
peal@list.ru

Михаил Александрович Нелюцков

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40

Владимир Викторович Антипенко

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40

Аннотация. Рассматриваются методы измерения параметров полупроводниковых материалов. Внимание акцентируется на описании резонансного и мостового методов измерения, а также приводится объяснение метода емкостного делителя. Выявляются их основные недостатки и достоинства.

Ключевые слова: параметры полупроводникового материала, метод емкостного делителя, резонансный метод, мостовой метод

Для цитирования: Тузова Д. Е., Печерская Е. А., Нелюцков М. А., Антипенко В. В. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов // Инжиниринг и технологии. 2023. Т. 8 (1). С. 1–5. doi: 10.21685/2587-7704-2023-8-1-4

Methods for measuring parameters of semiconductor materials

Diana E. Tuzova

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
diana.tuzova.02@bk.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
peal@list.ru

Mikhail A. Nelyutskov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia

Vladimir V. Antipenko

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia

Abstract. Methods of measuring parameters of semiconductor materials are considered. Attention is focused on the description of the resonant and bridge measurement methods, as well as an explanation of the capacitive divider method. Their main disadvantages and advantages are revealed.

Keywords: semiconductor material parameters, capacitive divider method, resonant method, bridge method

For citation: Tuzova D.E., Pecherskaya E.A., Nelyutskov M.A., Antipenko V.V. Methods for measuring parameters of semiconductor materials. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2023;8(1):1–5. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2023-8-1-4

Введение

В настоящее время полупроводниковые материалы нашли широкое применение в области микроэлектроники, приборостроения, систем управления и обработки сигналов. Они составляют основу



современных интегральных схем, дискретных приборов электроники, биполярных и полевых транзисторов, быстродействующих диодов и других компонентов электроники. Быстро развивающиеся информационные технологии, системы связи и передачи информации требуют совершенствования их элементной базы. Производство полупроводниковых материалов и изделий из них обязательно включает в себя процесс измерения их параметров, так как исследование вольт-фарадных характеристик полупроводникового материала предоставляет обширную информацию о его свойствах. С точки зрения применения в электронике, важнейшим является измерение таких параметров указанных материалов, как концентрации основных носителей заряда у полупроводниковых материалов, измерения емкости переходов, концентрации основных носителей заряда в полупроводниковых областях, толщина диэлектрического слоя и др.

Методы измерения параметров полупроводниковых материалов

На сегодняшний день существует большое количество методов для определения параметров полупроводников, в частности МДП-структур (металл – диэлектрик – полупроводник). Наиболее встречающимися в измерительной технике являются следующие методы.

1. Метод емкостного делителя.

Наиболее технически простым в реализации считается метод измерения емкости полупроводникового прибора, основанный на падении тест-напряжения U_x на структуре C_x с включенной последовательно эталонной емкостью C_3 известной величины [1].

Емкостной делитель, изображенный на рис. 1, питается от источника тестового сигнала (ИТС) значением U_T при частоте ω .

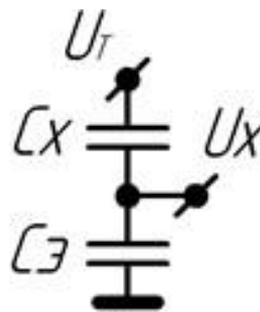


Рис. 1. Схема емкостного делителя

Падение тестового напряжения на измеряемой емкости вычисляется следующим выражением:

$$U_x = U_T \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{C_x}{C_3}} \right). \quad (1)$$

Зависимость отношения тест-напряжения от напряжения источника тестового сигнала и отношения емкости на исследуемом образце от известной нам эталонной емкости можно представить в виде функции $y = f(x)$, где значение аргумента y зависит от переменной x , а именно:

$$y = \frac{U_x}{U_T}, \quad x = \frac{C_x}{C_3} \Rightarrow \frac{U_x}{U_T} = f\left(\frac{C_x}{C_3}\right). \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что y принимает диапазон измерения (0;1). Произведя дифференцирование рассматриваемой функции $y = f(x)$, можно оценить точность данного метода измерения:

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{1}{(1+x)^2}. \quad (3)$$

Так как при исследовании данной функции не было обнаружено экстремума в области ее конечных значений и выявлено максимальное значение функции при малых значениях аргумента, можно сделать вывод, что данный метод имеет высокую точность измерения параметров полупроводниковых



материалов при $C_x \ll C_{\text{эт}}$. Недостатком является нелинейная зависимость напряжения измерительной цепи от величины измеряемой емкости, так как на практике часто возникает необходимость построения градуировочных кривых [2].

2. Мостовой метод.

На рис. 2 изображена схема мостового метода измерения параметров полупроводниковых материалов, который основан на сравнении исследуемого образца с мерой (C_1 – образцовый конденсатор; R_1 – внутреннее сопротивление образцовой емкости).

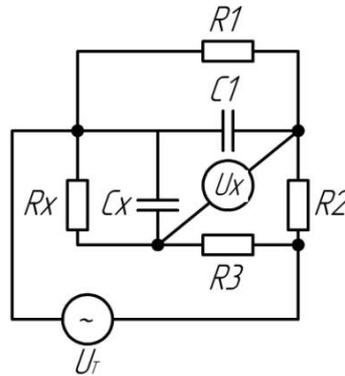


Рис. 2. Схема мостового метода

При подаче переменного сигнала сопротивление плеч моста в комплексной форме имеет следующий вид:

$$Z_i = R_i + j \cdot X_i. \quad (4)$$

Условия равновесия моста на переменном сигнале в действительной и показательной форме будут определяться следующими выражениями:

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4, \quad (5)$$

$$Z_1 e^{j\varphi_1} Z_3 e^{j\varphi_3} = Z_2 e^{j\varphi_2} Z_4 e^{j\varphi_4}, \quad (6)$$

где Z_i – модуль комплексного сопротивления; φ – фазовый сдвиг между током и напряжением в каждом плече.

Разделив выражение (6), получим следующие условия равновесия [3]:

$$Z_1 Z_3 = Z_2 Z_4,$$

$$\varphi_1 \varphi_3 = \varphi_2 \varphi_4.$$

Данные условия равновесия указывают на то, что мост находится в уравновешенном состоянии только при установлении равенства между модулями комплексных сопротивлений противолежащих плеч и при равенстве фазовых сдвигов между током и напряжением в каждом плече.

Для измерения емкости конденсаторов мостовым методом условие равновесия будет определяться следующим уравнением:

$$\frac{R_3}{C_1 \omega} = \frac{R_2}{C_x \omega}. \quad (7)$$

C_1 является нерегулируемым образцовым конденсатором высокой точности. Сопротивления R_1 и R_2 служат регулировкой для уравновешивания моста. Равновесие моста будет определяться следующими выражениями:

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2}, \quad (8)$$

$$C_x = \frac{C_1 R_2}{R_3}. \quad (9)$$



При замене на калибровочные емкости C_2 и C_3 сопротивления R_2 и R_3 напряжение в диагонали моста при изменении емкости C_x будет определяться как

$$U_x = U_T \left(\frac{1}{\frac{C_3}{C_2} + 1} \right) \left(\frac{\frac{C_x - C_3}{C_1} - \frac{C_3}{C_2}}{\frac{C_x}{C_1} + 1} \right). \quad (10)$$

Обозначив через $y = \frac{U_x}{U_T}$; $a = \frac{C_3}{C_2}$; $x = \frac{C_x}{C_1}$, выражение для функции преобразования неизвестной емкости в напряжение с помощью моста переписывается в виде

$$y(x) = \left(\frac{1}{1+a} \right) \left(\frac{x-a}{x+1} \right). \quad (11)$$

Из условий равновесия следует, что напряжение в диагонали моста достигает своего минимального значения при $x = 0$, следовательно $y(0) = \frac{-a}{1+a}$. При $y(\infty) = \frac{1}{1+a}$ достигается максимальное значение напряжения, т.е. диапазон изменения напряжения в диагонали моста не превышает значения тестового напряжения сигнала U_T . Продифференцировав функцию преобразования емкости в напряжение было установлено, что она не имеет экстремумов при всех возможных значениях аргумента, поскольку её производная быстро убывает с ростом аргумента x и достигается лишь при малом значении измеряемой емкости [5].

Недостаток данного метода аналогичен недостатку метода емкостного делителя.

3. Резонансный метод.

Данный метод измерения параметров полупроводниковых материалов подразумевает определение резонансной частоты колебательного контура, который имеет в своем исполнении измерительный и образцовый элемент (рис. 3).

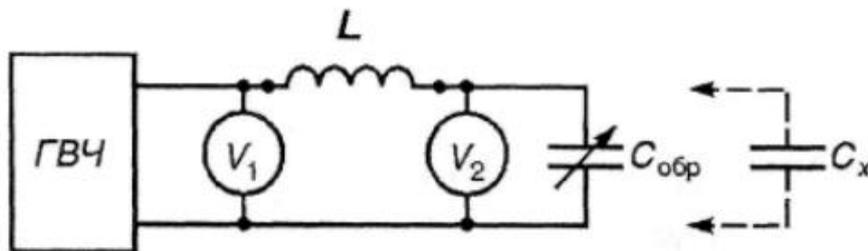


Рис. 3. Схема измерения параметров полупроводниковых материалов резонансным методом

Резонансный метод применяют для измерения параметров на высоких частотах, так как при измерении на низких частотах сильно падает точность измерения. Следовательно, его преимущество состоит в том, что измерения проводятся на рабочих частотах, порядка 10 МГц. Значение параметра полупроводникового материала определяется следующим выражением:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (12)$$

Данный метод производится двумя этапами и основывается на замещении емкости. Первый этап состоит в переведении колебательного контура в резонансное состояние. Оно достигается путем изменения частоты при некотором значении емкости образца с помощью генератора высоких частот [4–5]. При этом обязательным условием проведения метода является то, что значение емкости образца должно быть больше значения измеряемой емкости. Резонансная частота определяется следующей формулой:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{01}}}. \quad (13)$$



На втором этапе конденсатор измеряемой емкости подключается параллельно образцовому конденсатору. Изменяя емкость образцового конденсатора добивается резонанс колебательного контура при той же частоте, что и на первом этапе. Выражение для определения частоты имеет вид

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_{02}+C_x)}}. \quad (14)$$

Приравняв выражения (13) и (14), получим выражение для определения неизвестной емкости:

$$C_x = C_{01} - C_{02}. \quad (15)$$

При условии, что измеряемая емкость намного больше образцовой, выражение для определения неизвестной емкости принимает следующий вид:

$$C_x = \frac{C_{01}C_{02}}{C_{02} - C_{01}}. \quad (16)$$

При этом измерение необходимо проводить на такой частоте, при которой резонанс колебательного контура с подключенной неизвестной емкостью будет при значении C_{01} вблизи ее максимального значения.

Заключение

Метод емкостного делителя является простым в исполнении в отличие от мостовой схемы. Мостовая схема сама сложна в реализации и настройке, а также сильно зависит от внешних воздействий. Она же в отличие от первого метода обладает большим диапазоном измерения. В данных метода выходное напряжение измерительной цепи зависит от величины измеряемой емкости по нелинейному закону, что является нежелательным, так как в практической реализации обычно сводится к необходимости построения градуированных кривых выходного напряжения при подключении к измерительной цепи калиброванных емкостей. Резонансный метод позволяет проводить измерения на рабочей частоте.

Список литературы

1. Батавин В. В., Концевой Ю. А., Федорович Ю. В. Измерение параметров полупроводниковых материалов и структур. М., 1985.
2. Зи С. Физика полупроводников. М. : Мир, 1984. Т. 1.
3. Давыдов Н. В., Войцеховский А. В. Фотоэлектрические МДП структуры из узкозонных полупроводников. М., 1990. 327 с.
4. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем : пер. с англ. М. : Мир, 1989. 630 с.
5. Павлов Л. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высшая школа, 1987. 239 с.

References

1. Batavin V.V., Kontsevoy Yu.A., Fedorovich Yu.V. *Izmerenie parametrov poluprovodnikovykh materialov i struktur = Measurement of parameters of semiconductor materials and structures*. Moscow, 1985. (In Russ.)
2. Zi S. *Fizika poluprovodnikov = Physics of semiconductors*. Moscow: Mir, 1984:1. (In Russ.)
3. Davydov N.V., Voytsekhovskiy A.V. *Fotoelektricheskie MDP struktury iz uzkozonnykh poluprovodnikov = Photovoltaic TIR structures made of narrow-band semiconductors*. Moscow, 1990:327. (In Russ.)
4. Maller R., Keymins T. *Elementy integral'nykh skhem: per. s angl. = Elements of integrated circuits: transl. from english*. Moscow: Mir, 1989:630. (In Russ.)
5. Pavlov L. *Metody izmereniya parametrov poluprovodnikovykh materialov. 2-e izd., pererab. i dop. = Methods for measuring parameters of semiconductor materials. 2nd ed., reprint. and add.* Moscow: Vysshaya shkola, 1987:239. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 05.04.2023

Поступила после рецензирования и доработки / Revised 04.05.2023

Принята к публикации / Accepted 20.05.2023