

УДК 621.317: 621.3.08

Е. А. ЕРМОЛЕНКО, к. т. н. А. Ф. БОНДАРЕНКО, к. т. н. А. Н. БАРАНОВ

Украина, г. Алчевск, Донбасский государственный технический университет

E-mail: ermolenkoea@gmail.com, bondarenkoaf@gmail.com

ТЕПЛОВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ВАХ ИМПУЛЬСНЫМ СПОСОБОМ

В работе тепловая математическая модель использована для оценки саморазогрева полупроводниковых приборов в процессе измерения их вольт-амперной характеристики импульсным способом. Проанализировано влияние саморазогрева на электрические параметры полупроводниковых приборов. Сформулированы рекомендации по выбору значений параметров измерительной импульсной последовательности, использование которых позволяет минимизировать саморазогрев полупроводниковой структуры.

Ключевые слова: вольт-амперная характеристика, полупроводниковый прибор, импульсный способ измерения, тепловая модель.

Разработчики электронной аппаратуры часто сталкиваются с необходимостью измерения вольт-амперных характеристик (**ВАХ**) различных полупроводниковых приборов (**ПП**), для чего используются специализированные измерительные приборы — характериографы. Основным требованием к характериографам, как и к любым измерительным устройствам, является высокая точность измерений.

Известно, что на параметры и характеристики ПП существенное влияние оказывают колебания температуры [1], причем это влияние зачастую вызвано не столько температурой окружающей среды, сколько явлением саморазогрева полупроводниковой структуры во время протекания тока. Например, в процессе измерения ВАХ диода вследствие его саморазогрева положение прямой ветви может существенно отклоняться от исходного, и это отклонение будет тем больше, чем дольше проводится измерение.

Одним из эффективных путей снижения влияния саморазогрева ПП на точность измерения ВАХ является использование автоматизированных импульсных способов измерения. При таких измерениях на ПП подается последовательность импульсов с одновременной регистрацией откликов [2–6]. В связи с тем, что ток через исследуемый прибор протекает только в моменты действия импульсов, нагрев прибора уменьшается.

Известны различные импульсные способы измерения ВАХ ПП. Так, в [2] описан способ, который предусматривает синхронную подачу воздействующих импульсов длительностью в несколько десятков наносекунд во входные и выходные цепи. Характериограф, описанный в [3], формирует импульсную последовательность с периодом 500 мкс и с регулируемым коэффициентом заполнения. В измерителе ВАХ мало-

мощных ПП АСС-4211 [4] также реализован импульсный способ с длительностью импульсов 500 мкс и длительностью пауз между импульсами 1500 мкс. В [5] приведено описание анализатора параметров силовых полупроводниковых приборов фирмы Agilent с функцией характериографа, формирующего импульсы длительностью от 50 мкс. Кроме того, импульсный способ применяется в измерительных приборах «2430» и «2430-С» фирмы Keithley, где пользователем может задаваться длительность импульсов от 150 мкс до 5 мс с регулируемым коэффициентом заполнения [6].

Наряду с этим, ни в одной из этих работ нет описания критериев, в соответствии с которыми можно выбрать длительность воздействующих на ПП измерительных импульсов, а также длительность пауз между ними. Однако длительность импульсов, приемлемая для одних ПП, может оказаться недостаточной или неоправданно большой для других, поскольку они обладают различным быстродействием. Кроме того, в зависимости от тепловых свойств ПП длительность пауз между импульсами может оказаться недостаточной для полного остывания $p-n$ -перехода. Это может привести к накоплению тепла в процессе измерения и, вследствие этого, к отклонению ВАХ от подлинной [7].

Целью настоящей работы было повышение точности измерения ВАХ ПП при использовании автоматизированного импульсного способа за счет уменьшения разогрева полупроводниковой структуры. Для этого решались следующие задачи:

— получение математической модели, позволяющей рассчитать температуру ПП в процессе измерения его ВАХ импульсным способом;

- оценка отклонения ВАХ ПП вследствие его саморазогрева в процессе измерения;
- определение параметров импульсной измерительной последовательности, при которых саморазогрев полупроводниковой структуры будет минимальным.

Тепловая математическая модель

Основными параметрами полупроводникового прибора, которые используются при анализе его тепловых режимов, являются тепловое сопротивление и тепловая постоянная времени. Тепловое сопротивление препятствует распространению тепла в ПП, а тепловая постоянная времени характеризует его тепловую инерционность.

Полупроводниковый прибор рассматривается как структура, состоящая из m областей (полупроводниковый кристалл, припой, контактные выводы, корпус и т. д.), и каждая k -я область имеет собственное тепловое сопротивление R_k и тепловую постоянную времени T_k . Традиционная тепловая математическая модель ПП [1] описывает нагрев и остывание прибора в соответствии с экспоненциальным законом:

$$\theta_{heat}(t) = P \sum_{k=1}^m R_k \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T_k}\right) \right), \quad (1)$$

$$\theta_{cool}(t) = P \sum_{k=1}^m R_k \left(1 - \exp\left(-\frac{t_{imp}}{T_k}\right) \right) \exp\left(-\frac{t}{T_k}\right), \quad (2)$$

где θ_{heat} — температура во время действия импульса мощности;

θ_{cool} — температура в интервале паузы;

P, t_{imp} — мощность и длительность воздействующего импульса соответственно.

В [1] также отмечается, что в режиме коротких воздействующих импульсов миллисекундного диапазона доля участия внешних областей конструкции ПП в общем процессе нагрева $p-n$ -перехода практически равна нулю. В современных средствах измерения длительность используемых импульсных воздействий мала и составляет десятки-сотни микросекунд. Следовательно, при измерении ВАХ импульсным способом с применением таких средств нагрев будет локализован только в области $p-n$ -перехода ПП. С учетом этого, а также выражений (1) и (2), предлагается следующая усовершенствованная тепловая модель:

- при $\tau(i-1) \leq t \leq t_{imp} + \tau(i-1)$

$$\theta(i, t) = \theta_{i-1} + P_i R_{thjc} \left(1 - \exp\left(-\frac{t - \tau(i-1)}{T_{thjc}}\right) \right); \quad (3)$$

- при $t_{imp} + \tau(i-1) < t < \tau i$

$$\theta(i, t) = \theta_{i-1} + P_i R_{thjc} \left(1 - \exp\left(-\frac{t_{imp}}{T_{thjc}}\right) \right) \times \exp\left(-\frac{t - t_{imp} - \tau(i-1)}{T_{thjc}}\right) \quad (4)$$

где θ_{i-1} — температура ПП после действия i -го импульса с паузой;

P_i — мощность i -го воздействующего импульса;

R_{thjc}, T_{thjc} — тепловое сопротивление и тепловая постоянная времени области «переход — корпус»;

τ — период следования воздействующих импульсов.

Эта математическая модель учитывает эффект накопления тепла в структуре ПП, позволяет рассчитать температуру кристалла ПП в любой момент времени при воздействии на него заданной последовательности прямоугольных импульсов мощности. Для расчета температуры с помощью этой модели необходимо задать тепловые параметры ПП, а также параметры воздействующих импульсов: мощность, длительность и период следования.

Моделирование процесса нагрева силового и маломощного ПП при измерении их ВАХ

Поскольку транзистор является усилительным прибором, даже незначительные изменения его входных характеристик под влиянием температуры могут существенно отражаться на изменении выходных. Потому проведем моделирование процесса изменения температуры силового и маломощного полевых МОП-транзисторов при измерении их ВАХ. Оценим влияние температуры на их электрические параметры и степень отклонения ВАХ при следующих исходных параметрах:

- начальная температура $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$;
- напряжение «сток — исток» $U_{DS} = 10\text{ В}$;
- количество импульсов 25.

Рассмотрим в качестве примера силовой ПП n -канальный полевой МОП-транзистор IRF2804. Основываясь на данных об анализаторе параметров силовых ПП Agilent B1505A [5], примем длительность импульса $t_{imp} = 50$ мкс, длительность паузы $t_p = 200$ мкс. В соответствии со спецификацией транзистора IRF2804 от производителя [8], тепловое сопротивление «переход — корпус» R_{thjc} при выбранных t_{imp} и t_p составляет 0,115 К/Вт. Согласно рекомендациям [9, 10], примем теплоемкость $C_{th} = 0,003$ Вт·с/К. Следовательно, тепловая постоянная времени будет равна

$$T_{thjc} = R_{thjc} C_{th} = 3,45 \cdot 10^{-4} \text{ с}. \quad (5)$$

Мощность прикладываемых импульсов P определяется суммарной мощностью управля-

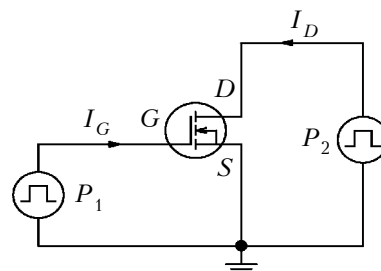


Рис. 1. Схема подачи импульсов на полевой МОП-транзистор

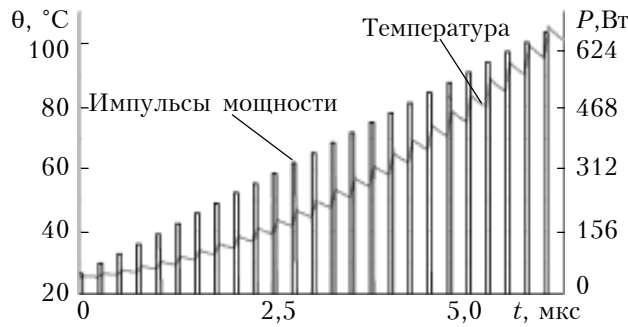


Рис. 2. Изменение температуры силового транзистора IRF2804 в процессе измерения его ВАХ импульсным способом

ющего импульса P_1 и питающего импульса P_2 (рис. 1). Поскольку ток затвора полевого транзистора пренебрежимо мал, мощность воздействующего сигнала будет определяться мощностью P_2 .

Для расчетов зададим следующие параметры:

- мощность первого импульса 50 Вт;
- шаг изменения мощности импульсной последовательности 25 Вт.

Результаты расчета, представленные на рис. 2, показали, что за время измерения ВАХ указанным способом исследуемый ПП нагреется на 76°C. Проанализируем, насколько существенно влияние такого нагрева на электрические характеристики силового ПП.

Одним из основных параметров полевого транзистора, зависящих от температуры, является его ток стока. Степень влияния температуры на этот параметр характеризуется температурным коэффициентом тока стока, который показывает во сколько раз изменится ток стока транзистора при изменении его температуры на 1°C, и согласно [11] вычисляется по формуле

$$K_{Id}(U_{GS}) = \frac{1}{K} \frac{dK}{d\theta} - \frac{2}{(U_{GS} - U_0)} \frac{dU_0}{d\theta}, \quad (5)$$

где K — удельная крутизна передаточной характеристики;

U_{GS} — напряжение «затвор — исток»;

U_0 — пороговое напряжение.

Используя числовые значения параметров, приведенные в [8, 11], можно определить значение этого коэффициента при заданном напряжении «затвор — исток» U_{GS} , и затем рассчитать изменение тока стока ΔI_D при изменении температуры на $\Delta\theta$:

$$\Delta I_D(U_{GS}) = I_D K_{Id}(U_{GS}) \Delta\theta. \quad (6)$$

Это выражение позволяет рассчитать изменения тока стока транзистора в интервале действия каждого импульса и оценить отклонение его ВАХ. На рис. 3 представлены передаточная ВАХ из спецификации на транзистор IRF2804 [8] при температуре перехода 25°C и ВАХ, рассчитанная с учетом нагрева его структуры в процессе измерения.

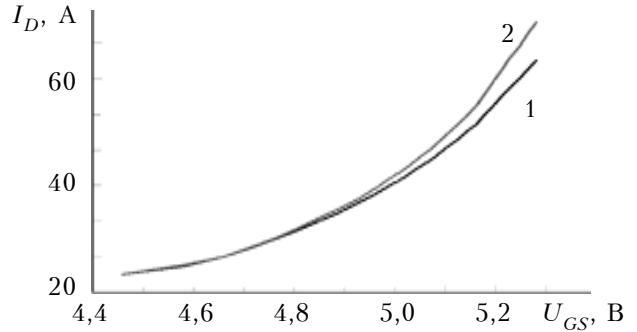


Рис. 3. Передаточная ВАХ силового транзистора IRF2804, приведенная в спецификации (1) и рассчитанная с учетом нагрева (2)

Расчеты показали, что максимальное отклонение тока стока ΔI_D в результате накопления тепла достигло 10,8 А, что составило 16,6% от максимального значения тока на паспортной ВАХ, среднеквадратическое отклонение характеристики составило 4,9 А.

Таким образом, проведенные расчеты подтвердили, что некорректное задание параметров импульсной последовательности при измерении ВАХ силового ПП может привести к значительному нагреву его структуры и, вследствие этого, к существенному искажению измеряемой характеристики.

Рассмотрим в качестве примера ПП малой мощности n -канальный полевой МОП-транзистор 2N7000. Тепловые параметры ПП зададим согласно данным из спецификации [12]: $R_{thjc} = 10,8$ К/Вт, $C_{th} = 0,003$ Вт·с/К, $T_{thjc} = 0,032$ с⁻¹.

Для расчетов зададим следующие параметры:

- мощность первого импульса 0,8 Вт;
- шаг изменения мощности импульсной последовательности 0,8 Вт.

Результаты вычислений, представленные на рис. 4, показали, что при измерении ВАХ мало-мощного ПП его структура нагревается на 4,3°C.

Анализ влияния температуры на электрические характеристики прибора проводился аналогично силовому ПП, его результаты представлены на рис. 5.

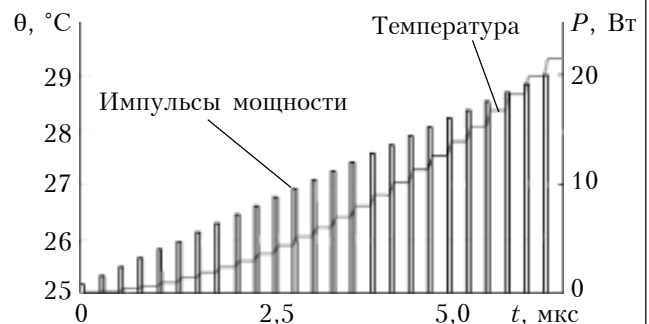


Рис. 4. Изменение температуры маломощного транзистора 2N7000 в процессе измерения его ВАХ импульсным способом

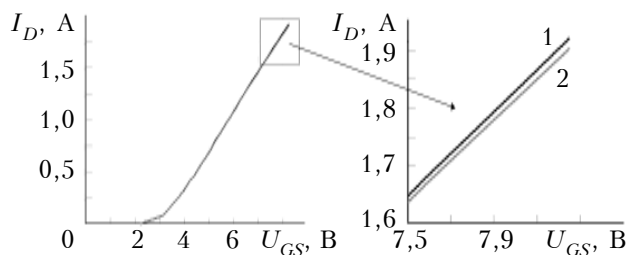


Рис. 5. Передаточная ВАХ маломощного транзистора 2N7000, приведенная в спецификации (1) и рассчитанная с учетом нагрева (2)

Расчеты показали, что максимальное отклонение тока стока ΔI_D в результате накопления тепла достигло 18 мА. Это значение составило 0,9% от максимального значения тока на паспортной ВАХ [12], а среднеквадратическое отклонение характеристики составило 6,8 мА. То есть искажение ВАХ маломощного ПП менее существенно, чем силового, а числовые значения отклонения полученной ВАХ от паспортной пренебрежимо малы, что объясняется меньшим нагревом структуры маломощного ПП в процессе измерений.

Временные параметры импульсных воздействий при измерении ВАХ

Для исключения излишнего нагрева ПП во время действия импульса его длительность должна быть минимальной, но достаточной для завершения переходного процесса. Анализ параметров современных ПП таких производителей, как Fairchild Semiconductor, ON Semiconductor, Texas Instruments, NXP, показал, что максимальная длительность переходного процесса не превышает 10 мкс как для маломощных, так и для силовых ПП. Поэтому при измерении ВАХ различных ПП можно рекомендовать воздействие импульсами длительностью 10 мкс.

Для минимизации накопления тепла, длительность паузы после каждого воздействующего импульса должна быть достаточной для возвращения ПП в исходное тепловое состояние. Согласно выражению (2), остывание ПП происходит по экспоненциальному закону, поэтому для определения момента остывания необходимо задать некоторым пороговым значением температуры, при достижении которого прибор можно считать остывшим.

С целью уточнения длительности паузы между воздействующими импульсами рассчитаем время, необходимое для остывания ПП в «наихудшем» случае — при подаче на силовой ПП импульса максимально допустимой мощности. В качестве силового прибора возьмем полевой МОП-транзистор IRF2804, мощность импульса зададим равной 750 Вт [8], длительность импульса 10 мкс, начальную температуру 25°C, пороговое значение температуры 25,1°C.

Результаты расчетов, полученные с использованием тепловой математической модели (3), (4),

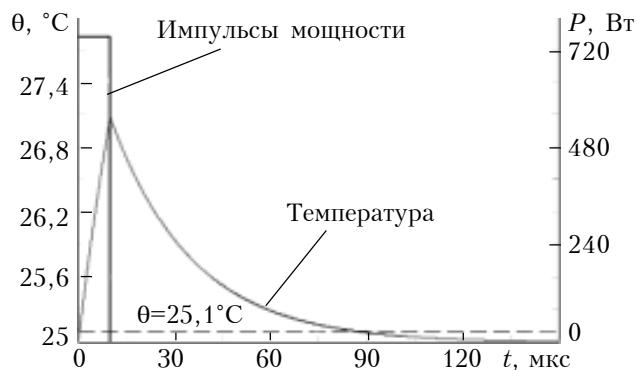


Рис. 6. Изменение температуры кристалла силового транзистора IRF2804 при воздействии на него прямоугольного импульса мощностью 750 Вт и длительностью 10 мкс

представленные на рис. 6, показывают, что при заданных условиях время остывания силового ПП составляет 80 мкс. Соответственно, при подаче менее мощных импульсов температура нагрева и время остывания полупроводниковой структуры будут меньше.

Расчеты, выполненные для ряда силовых полупроводниковых приборов других производителей, показали, что пауза длительностью 80 мкс является достаточной для возвращения кристаллов этих ПП в исходное тепловое состояние.

Результаты моделирования процесса нагрева силового ПП IRF2804 при измерении его ВАХ импульсным способом с рекомендуемыми параметрами измерительных импульсов представлены на рис. 7. Из временных диаграмм видно, что температура транзистора перед каждым следующим импульсом возвращается к значению, близкому к первоначальному, и нагрев ПП за время измерения ВАХ составил приблизительно 1°C.

Расчет отклонения ВАХ ПП при использовании рекомендуемых параметров импульсной последовательности показал, что максимальное отклонение ΔI_D тока стока в результате накопления тепла не превысило 0,15 А, что составило 0,2% от максимального значения тока на паспортной ВАХ, среднеквадратическое отклонение

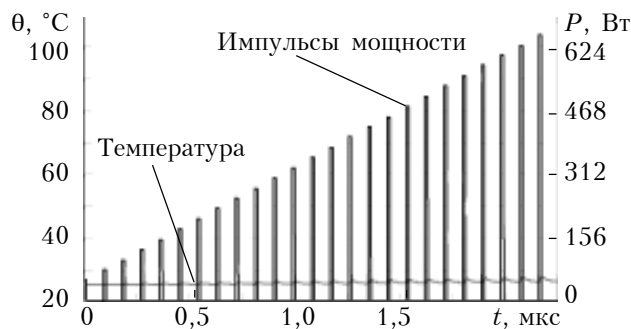


Рис. 7. Изменение температуры силового транзистора IRF2804 в процессе измерения его ВАХ импульсным способом с рекомендуемыми параметрами

характеристики составило 68 мА. Такое отклонение для силового ПП можно считать пренебрежимо малым.

Следует иметь в виду, что при использовании указанных значений параметров импульсной последовательности для маломощных приборов и большом количестве измерительных импульсов, время измерения будет неоправданно большим. С целью его сокращения для маломощных приборов может быть применен адаптивный способ, предложенный в [13].

Выводы

Анализ способов измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов показал, что наиболее перспективными с точки зрения снижения разогрева полупроводниковой структуры в процессе измерения являются автоматизированные импульсные способы.

Расчеты, проведенные с использованием предложенной тепловой математической модели, позволили установить, что некорректное задание параметров импульсной последовательности для силовых полупроводниковых приборов приводит к значительному нагреву их структуры и, соответственно, существенному искажению измеряемых характеристик, тогда как для маломощных приборов это искажение пренебрежимо мало.

Использование предложенной тепловой модели, учитывающей накопление тепла, позволило определить, что при длительности импульсов 10 мкс и длительности пауз между ними 80 мкс нагрев структуры полупроводникового прибора минимизируется.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Давидов П. Д. Анализ и расчет тепловых режимов полупроводниковых приборов. — Москва: Энергия, 1967. [Davidov P. D. Analiz i raschet teplovykh rezhimov poluprovodnikovyykh priborov. Moskva: Energiya, 1967]
2. Pat. WO 2004034071. Semiconductor Monitoring Instrument / Ladbroke Peter, Goodship Neil. — 22. 04. 2004.
3. Schuster R. Transistor Curve Tracer // Elector. — 2009. — N 2. — P. 24—31.
4. Кудреватых Е. Ф. Виртуальный измеритель вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов АСС-4211 // Контрольно-измерительные приборы и системы. — 2002. — № 1. — С. 17—19. [Kudrevatykh E. F. // Kontrol'no-izmeritel'nye pribory i sistemy. 2002. N 1. P. 17]
5. Agilent, Agilent B1505A Power Device Analyzer / Curve Tracer Data Sheet <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-3853EN.pdf>
6. Keithley Instruments Inc., Series 2400 SourceMeter® Line <http://www.keithley.com/data?asset=372>
7. Тугов Н. М., Глебов Б. А., Чарыков Н. А. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов. — Москва: Энергоатомиздат, 1990. [Tugov N. M., Glebov B. A., Charykov N. A. Poluprovodnikovye pribory: Uchebnik dlya vuzov. Moskva: Energoatomizdat, 1990]
8. International Rectifier, Automotive MOSFET IRF2804 Data Sheet <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irf2804.pdf>
9. Lenz M., Striedl G., Frohler U. Thermal Resistance. Theory and Practice // Infineon Technologies Special subject book. — 2000. — N1. — P. 1—34.

10. Du B., Hudgins J. L., Santi E. et al. Transient thermal analysis of power devices based on Fourier-series thermal model // Power Electronics Specialists Conference. — IEEE. — 2008. — P. 3129—3135.

11. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. Том 1. — Москва: ДМК Пресс, 2008. [Tittse U., Shenk K. Poluprovodnikovaya skhemotekhnika. Tom 1. Moskva: DMK Press, 2008]

12. Fairchild Semiconductor, N-Channel Enhancement Mode Field Effect Transistor 2N7000 Data Sheet <http://www.fairchildsemi.com/ds/2N/2N7000.pdf>

13. Бондаренко А. Ф., Ермоленко Е. А. Способ автоматизированного снятия вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. — 2010. — Ч. 2. — С. 126—129. [Bondarenko A. F., Ermolenko E. A. // Tekhnichna elektrodinamika. Tem. vip. Problemi suchasnoyi elektrotekhniki. 2010. Part 2. P. 126]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 17.01 2012 г.*

Yermolenko Ye. O., Bondarenko O. F., Baranov O. M. **Thermal mathematical model of semiconductor devices for measurement of current-voltage characteristics by pulse method.**

Keywords: current-voltage characteristics, semiconductor device, pulse method of measurement, thermal model.

The thermal mathematical model is used to estimate self-heating of semiconductor devices of various types during current-voltage characteristics measuring by the pulse method. The influence of self-heating on electrical parameters of semiconductor devices is analyzed. The recommendations for determination of values of measuring pulse sequence parameters are formulated to minimize self-heating of semiconductor structure.

Ukraine, Alchevsk, Donbass State Technical University.

Ермоленко Є. О., Бондаренко О. Ф., Баранов О. М. **Теплова математична модель напівпровідникових приладів при вимірюванні вольт-амперних характеристик імпульсним способом.**

Ключові слова: вольт-амперна характеристика, напівпровідниковий прилад, імпульсний спосіб вимірювання, тепла модель.

Теплова математична модель використовується для оцінки саморозігріву напівпровідникових приладів різних типів в процесі вимірювання їх ВАХ імпульсним способом. Проаналізовано вплив саморозігріву на електричні параметри напівпровідникових приладів. Сформульовано рекомендації з вибору значень параметрів вимірювальної імпульсної послідовності, використання яких дозволяє мінімізувати саморозігрів напівпровідникової структури.

Україна, м. Алчевськ, Донбаський державний технічний університет.