

ним торцом корпуса и покрытием. Учитывая результаты работы [1], можно утверждать, что краевой эффект будет минимальным при использовании корпуса, соответствующего условиям  $H = 3$  мм и  $S = 1,5$  мм. Для минимизации дополнительной погрешности, обусловленной неровностями или кривизной по-верхности покрытия, необходим зазор  $Z = 1$  мм.

#### Литература

1. Булатов, О. В. Влияние толщины стенки стального корпуса преобразователя магнитодинамического толщиномера на краевой эффект / О. В. Булатов // Приборостроение – 2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., Минск, 18–20 ноября 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : О.К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 21–22.

УДК 620.179.142.6

### ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ИНФОРМАТИВНОЙ ЗОНЫ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ТОЛЩИНЕ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ОТ ТОЛЩИН СТЕНОК СТАЛЬНОГО КОРПУСА

Булатов О.В.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** В работе методом конечных элементов впервые исследовано влияние толщин вертикальной и горизонтальной стенок стального корпуса магнитодинамического преобразователя на модуль намагниченности его информативной зоны и обеспечиваемую им чувствительность к никелевым покрытиям толщиной от 0 до 700 мкм. Установлено, что при толщинах стенок, сводящих краевой эффект к минимуму, минимизируется дополнительная погрешность, обусловленная вариацией внутренних напряжений никеля, а также обеспечивается очень высокая чувствительность даже в самом конце указанного диапазона.

**Ключевые слова:** магнитодинамический преобразователь, никелевое покрытие, модуль намагниченности, толщина покрытия, чувствительность.

### DEPENDENCE OF THE MAGNETIZATION MODULUS OF THE INFORMATIVE AREA OF THE MAGNETO-DYNAMIC TRANSDUCER AND ITS SENSITIVITY TO THE THICKNESS OF NICKEL COATINGS ON THICKNESSES OF THE STEEL CASE WALLS

Bulatov O.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus  
Minsk, Belarus*

**Abstract.** In the paper the effect of the thicknesses of steel case vertical and horizontal walls of the magneto-dynamic transducer on the magnetization modulus of its informative area and providing by it sensitivity to nickel coatings with thickness from 0 up to 700 micrometers is for the first time investigated by means of the finite element method. It is established that with the walls thicknesses minimizing the edge effect, the additional error conditioned by the variation of nickel internal stresses is minimized, and also very high sensitivity is provided even at the very end of the mentioned range.

**Key words:** magneto-dynamic transducer, nickel coating, magnetization modulus, coating thickness, sensitivity.

*Адрес для переписки: Булатов О.В., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь  
e-mail: lab1@iaph.bas-net.by*

**Введение.** Необходимость отстройки от влияния вариации внутренних напряжений никелевых покрытий на точность их магнитодинамической толщинометрии подтверждена экспериментально еще в работе [1]. Там же показано, что эта отстройка достигается в случае сильного первичного поля, намагничивающего информативную зону преобразователя до состояния, достаточно близкого к техническому насыщению никеля. В настоящей работе методом конечных элементов исследована зависимость модуля намагниченности информативной зоны от толщин обеих стенок стального цилиндрического корпуса магнитодинамического преобразователя, предназначенного для толщинометрии

никелевых покрытий в диапазоне от 0 до 700 мкм. Кроме того, установлено влияние указанных толщин на чувствительность преобразователя к толщине покрытий.

**Методика и результаты исследования.** Модуль  $I_{Лиз}$  вычислен во всем объеме информативной зоны вышеуказанного преобразователя, ограниченной ее радиусом  $R_{из}$ , зависящим от толщин  $H$  вертикальной и  $S$  горизонтальной стенок корпуса, и толщиной  $b$  никелевого покрытия. Зависимости  $I_{Лиз}(H)$  и  $I_{Лиз}(S)$ , построенные при оптимизированных толщинах  $S$  и  $H$  [2] соответственно, представлены на рис. 1 и 2, при этом верхние графики приведены для малого значения толщины  $b$ , а нижние – для максимального.

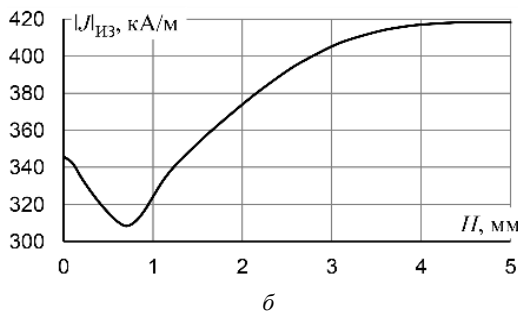
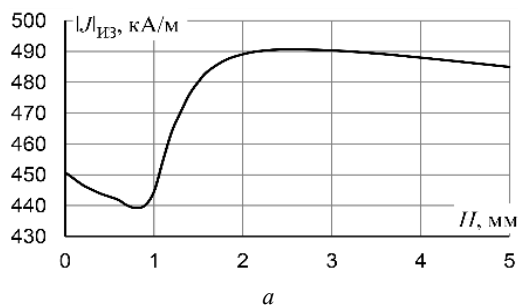


Рисунок 1 – Зависимость модуля  $|J|_{из}$  намагниченности информативной зоны в никелевом покрытии толщиной 100 мкм (а) или 700 мкм (б) от толщины  $H$  ( $S = 1,5$  мм)

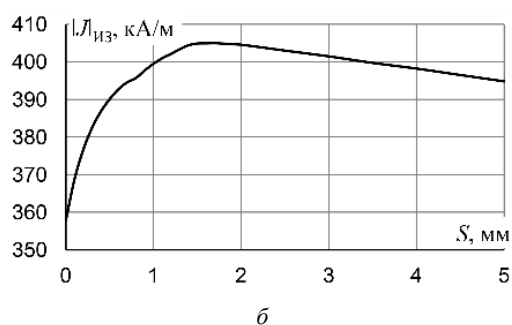
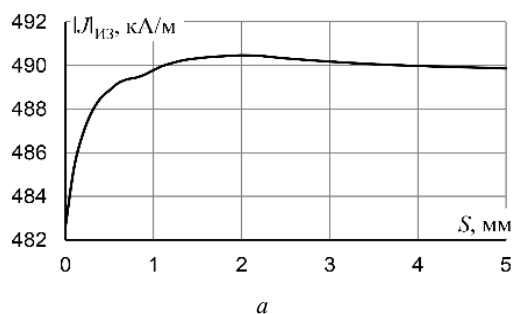


Рисунок 2 – Зависимость модуля  $|J|_{из}$  намагниченности информативной зоны в никелевом покрытии толщиной 100 мкм (а) или 700 мкм (б) от толщины  $S$  ( $H = 3$  мм)

Чувствительность преобразователя к толщине  $b$  вычислена как отношение изменения  $\Delta\Phi$  его информативного сигнала к достаточно малому приращению верхнего предела рассматриваемого диапазона (т. е. к значению  $\Delta b = 1$  мкм, на которое возрастала максимальная толщина  $b_{max} = 700$  мкм). Графики зависимостей  $\Delta\Phi/\Delta b(H)$  и  $\Delta\Phi/\Delta b(S)$  изображены на рис. 3.

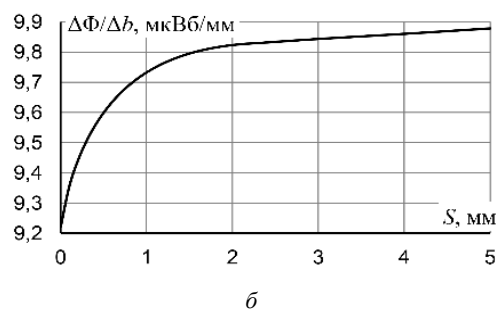
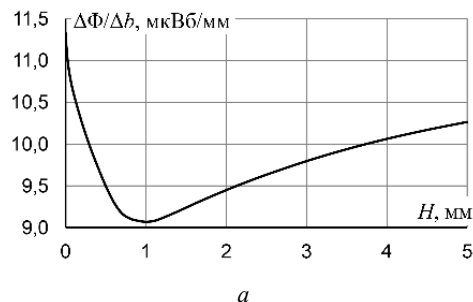


Рисунок 3 – Зависимость чувствительности  $\Delta\Phi/\Delta b$  преобразователя от толщины  $H$  при  $S = 1,5$  мм (а) или от толщины  $S$  при  $H = 3$  мм (б), соответствующая верхнему пределу диапазона толщины  $b$

**Анализ результатов.** Увеличение толщины  $H$  при фиксированной толщине  $S$  сначала приводит не только к очень существенному уменьшению радиуса  $R_{из}$  [2], но и к резкому повышению концентрации силовых линий магнитной индукции, рассеянных в своем большинстве в воздухе при отсутствии корпуса, в его вертикальной стенке. В итоге модуль  $|J|_{из}$  заметно уменьшается, что видно по обоим графикам на рис. 1. Так как при дальнейшем увеличении  $H$  магнитное взаимодействие корпуса с покрытием значительно усиливается,  $|J|_{из}$ , наоборот, стремительно возрастает, что особенно заметно при малых значениях  $b$ .

Из рис. 1 и 2 следует, что модуль  $|J|_{из}$ , убывая по мере возрастания толщины  $b$ , не опускается ниже 300 кА/м, т. е. при любом ее значении превышает половину модуля  $|J|_s$  намагниченности насыщения никеля. Так как при оптимальных толщинах  $H$  и  $S$  первый из этих модулей составляет более двух третей второго, можно утверждать, что в данном случае преобразователь обеспечивает достаточную отстройку от вариации внутренних напряжений никелевых покрытий.

Сопоставление расчетных данных с результатами многочисленных экспериментов свидетельствует о том, что минимально допустимая чувствительность любого магнитодинамического преобразователя составляет примерно 1 мкВб/мм. Исходя из этого, оба графика на рис. 3 свидетельствуют о достаточно высокой чувствительности  $\Delta\Phi/\Delta b$  даже в конце диапазона толщины  $b$ . В его начале  $\Delta\Phi/\Delta b$  максимальна: расчеты показывают, что при  $S = 1,5$  мм она в зависимости от  $H$  состав-

ляет от 15,6 до 13,3 мкВб/мм, а при  $H = 3$  мм и разной  $S$  – от 13,1 до 13,8 мкВб/мм, при этом характер обеих зависимостей не изменяется. Минимум функции  $\Delta\Phi/\Delta b = f(H)$  при  $H \approx 1$  мм, представленный на рис. 3, а, объясняется наличием минимума на обоих графиках рис. 1.

**Выводы.** В настоящей работе установлено, что стальной корпус с вертикальной стенкой толщиной 3 мм и горизонтальной толщиной 1,5 мм обеспечивает рассмотренному преобразователю наибольшую отстройку от вариации внутренних напряжений никелевых покрытий и очень высокую чувствительность даже к их максимальной толщине, достигающей 700 мкм.

УДК 621.382

### АППАРАТУРА И МЕТОД АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Бумай Ю.А., Васьков О.С., Нисс В.С.

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Разработан импеданс-спектрометр тепловых процессов и метод, позволяющие на основе переходных электрических процессов анализировать внутреннюю структуру тепловых сопротивлений мощных полупроводниковых приборов и представлять ее в виде спектра тепловых сопротивлений, соответствующих элементам их конструкций. Разработан метод получения профилей распределения теплового потока по элементам структуры приборов.

**Ключевые слова:** мощные полупроводниковые приборы, тепловые параметры, тепловая релаксационная дифференциальная спектроскопия, тепловое сопротивление, аппаратура контроля электротепловых процессов в приборах.

### EQUIPMENT AND METHOD OF ANALYSIS OF TRANSIENT ELECTRICAL PROCESSES IN STUDIES OF THERMAL PARAMETERS OF HIGH-POWER SEMICONDUCTOR DEVICES

Bumai Yu., Vaskov O., Niss V.

*Belarusian National Technical University  
Minsk, Belarus*

**Abstract.** An impedance spectrometer of thermal processes and a method have been developed, which allow analyzing the internal structure of thermal resistances of high-power semiconductor devices on the basis of transient electrical processes and presenting it in the form of a spectrum of thermal resistances corresponding to the elements of their designs. A method for obtaining heat flow distribution profiles for the elements of the device structure has been developed.

**Keywords:** high-power semiconductor devices, thermal parameters, thermal relaxation differential spectroscopy, thermal resistance, equipment for monitoring electrothermal processes in devices.

*Адрес для переписки: Бумай Ю.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь  
e-mail: yuabumai@bntu.by*

Способность отводить тепло от кристаллов мощных полупроводниковых приборов относится к одному из основных сдерживающих факторов силовой электроники, так как перегрев кристалла приводит к быстрой деградации, резкому снижению времени работы или отказу приборов. Это приводит к необходимости анализа структуры внутреннего теплового сопротивления для таких приборов. В связи с этим в БНТУ разработан импеданс-спектрометр тепловых процессов,

### Литература

1. Лухвич, А. А. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины покрытий с неоднородными свойствами (эксперимент) / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 46–53.
2. Булатов, О. В. Влияние толщины стенки стального корпуса преобразователя магнитодинамического толщиномера на краевой эффект / О. В. Булатов // Приборостроение – 2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., Минск, 18–20 ноября 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : О.К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 21–22.