

Рисунок 3 – Спектры комбинационного рассеяния от образцов Cz Si имплантированных водородом дозами 0,1,  $0,5 \times 10^{16}$  и  $1 \times 10^{16}$  ат/см<sup>2</sup> и обработанных в плазме водорода при 300 °С.

На рисунке 4 представлены данные СЭМ, полученные с поверхности образца кремния, имплантированного гелием дозой  $5 \cdot 10^{15}$  ат/см<sup>2</sup> и обработанных в плазме водорода при 300 °С.

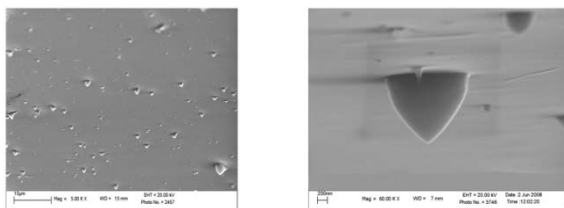


Рисунок 4 – Образ СЭМ поверхности образца кремния, содержащего массив образований и одиночное коническое образование.

Как видно из рисунка 4, на поверхности кремниевой пластины, после соответствующих

обработок, формируется массив конических поверхностных образований.

Данные комбинационного рассеяния, представлены на рисунке 5.

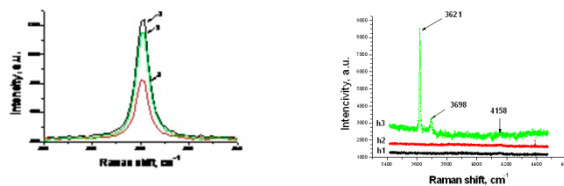


Рисунок 5 – Данные комбинационного рассеяния в спектральном диапазоне, соответствующем основной линии кремния (слева) и положению водородной молекулы в решетке кремния (справа)

Из представленных данных видно, что конические образования не имеют напряжений растяжения/сжатия, и сигнал сопоставляемый водородной молекуле, не наблюдается.

#### Литература

1. N.V. Frantskevich, A.V. Frantskevich, A.K. Fedotov, A.V. Mazanik // Journal: Solid State Phenomena. – 2009. – Vol. 156–158. – P.91-94.
2. Bernard Terreaux, Phys. stat. sol. (a) 204, No. 7, 2129–2184 (2007).

УДК 621.371.39

### КОМПОЗИТЫ НА ОСНОВЕ ТИТАНОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЛЯ ЭКРАНИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

**Бойправ О.В., Богущ Н.В., Лыньков Л.М.**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

Одним из факторов, определяющих надежность работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), является ее защищенность от воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ-диапазона. В настоящее время это обеспечивается путем электромагнитной развязки контуров такой аппаратуры либо путем металлизации корпусов, в которые заключены ее излучающие элементы. Однако следствием реализации второго из указанных способов может являться возникновение переотраженных электромагнитных волн. Эти волны, будучи наведенными на проводные линии, по которым передаются сигналы управления РЭА, оказывают влияние на надежность функционирования последней. Решение такой проблемы реализуется путем снижения напряженности ЭМИ, переотражаемого от металлизированных корпусов рассматриваемой аппаратуры. Для этого на них наносят материалы, характеризующиеся диэлектрическими или магнитными свойствами [1]. В качестве таких материалов в

работе предлагается использовать композиты с наполнителями, содержащими титановые соединения. К ним относятся порошкообразные диоксид титана и титаномагнетит, которые по сравнению с иными порошковыми структурами, обеспечивающими потери энергии ЭМИ, характеризуются невысокой стоимостью.

Получение предложенных композитов реализовано с помощью метода литьевого прессования. При этом в качестве матрицы применялся кремнийорганический полимер. Выбор последнего обусловлен тем, что материалы на его основе характеризуются свойством гибкости (при условии, что объем полимера составляет, как минимум, 50 % от общего объема материала).

Экспериментальное обоснование эффективности использования предложенных композитов в целях снижения напряженности ЭМИ, переотражаемого от металлических материалов, выполнялась путем оценки значений их коэффициента отражения. При этом

применялся аппаратно-программный комплекс, включающий в себя следующие элементы:

- 1) панорамный измеритель SNA 0.01–17;
- 2) приемно-передающий тракт на основе волноводов и двух антенн типа П6-23М;
- 3) измерительные блоки для ответвления и детектирования амплитуды электромагнитных волн, падающих на поверхность исследуемых образцов и отражаемых от нее;
- 4) персональный компьютер, на котором установлено специальное программное обеспечение для управления процессом измерений и регистрации их результатов.

Измерения с использованием описанного аппаратно-программного комплекса выполнялись в автоматизированном режиме в соответствии с методикой, представленной в работе [2]. Исследованный диапазон частот ЭМИ – 0,7...17 ГГц. Выбор указанного диапазона обусловлен частотными характеристиками побочного ЭМИ современной РЭА [3].

Величина шага изменения значения частоты составляла 0,005 ГГц или 0,05 ГГц в зависимости от поддиапазона, в котором проводились измерения (0,7...2 ГГц или 2...17 ГГц соответственно). Количество контрольных точек, на которых проводились измерения значений коэффициента отражения ЭМИ в указанных диапазонах частот – 512.

На рисунках 1 и 2 представлены частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...17 ГГц образцов предложенных композитов. В ходе измерений этих образцы размещались на металлических подложках. Толщина образцов составляла  $0,5 \pm 0,1$  см.

Из рисунков 1 и 2 следует, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 0,7...2 ГГц композита с наполнителем на основе порошкообразного диоксида титана изменяются в пределах от –2 до –23 дБ, а в диапазоне частот 2...17 ГГц – от –6 до –16 дБ. При этом рассматриваемый композит обеспечивает наибольшее снижение напряженности ЭМИ, отражаемого от металлического материала, при условии, что частота такого излучения составляет 1,2 ГГц. Такая особенность может быть связана с тем, что на указанной частоте обеспечивается максимальное значение разности фаз электромагнитных волн, отражаемых от границ раздела «воздух–композит», «композит–металлический материал», «композит–воздух». Это обуславливает взаимную компенсацию их энергии. Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 10...11 ГГц у композита с наполнителем на основе порошкообразного титаномагнетита выше на 1...8 дБ ниже, чем у композита на основе диоксида титана. Это обусловлено явлением естественного ферромагнитного резонанса, возникающего вследствие поглощения титаномагнетитом

энергии взаимодействующего с ним ЭМИ указанного диапазона частот [4].

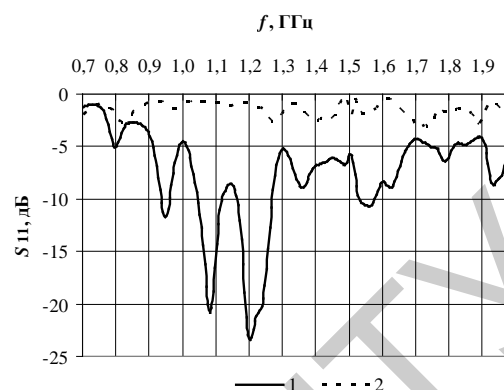


Рисунок 1 – Частотная зависимость коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 0,7...2 ГГц образцов композитов с наполнителем на основе диоксида титана (1) и титаномагнетита (2)

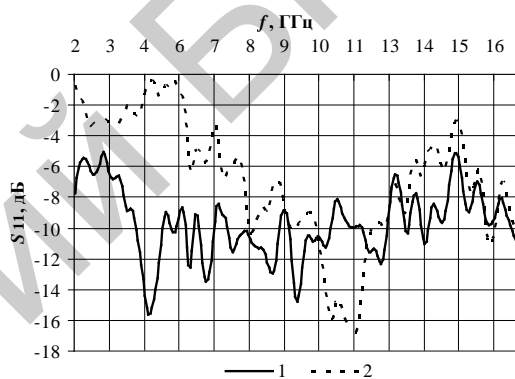


Рисунок 2 – Частотная зависимость коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2...17 ГГц образцов композитов с наполнителем на основе диоксида титана (1) и титаномагнетита (2)

Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазонах частот 0,7...10 ГГц и 11...17 ГГц у рассматриваемого композита на 1...15 дБ, чем у композита на основе диоксида титана. Это связано с тем, что порошкообразный титаномагнетит характеризуется узким рабочим диапазоном частот.

Представленные значения коэффициента отражения ЭМИ композитов соответствуют соотношению объемов наполнителей и связующего в них, составляющему 1:1. Определено, что указанное соотношение является оптимальным, т.к. при нем обеспечиваются минимально возможные величины исследуемого параметра для композита при условии отсутствия деструкции последнего, обусловленной сорбцией влаги из связующего частицами порошкообразного наполнителя.

Таким образом, на основе анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что в целях снижения напряженности ЭМИ, переотражаемого от металлизированных корпусов РЭА, наиболее эффективным представляется

использование композитов, в состав которых входит порошкообразный диоксид титана. При этом может использоваться один из следующих способов.

Способ 1. Нанесение на корпуса РЭА находящейся в жидкой фазе смеси кремнийорганического полимера и порошкообразного диоксида титана. Смешивание указанных компонентов при этом необходимо реализовывать с помощью промышленного миксера. Толщина наносимого слоя смеси будет определяться требованиями к диапазону частот ЭМИ, в котором необходимо обеспечить наибольшее снижение напряженности переотражаемого ЭМИ (т. е. наименьшее значение коэффициента отражения ЭМИ структуры «металлизированная поверхность–композит»). Минимальная величина коэффициента отражения будет соответствовать частоте, на которой значение длины электромагнитной волны в 4 раза превышает толщину слоя композита (т. е. структура «металлизированная поверхность–композит» будет четвертьволновой).

Способ 2. Закрепление на стенках корпусов

РЭА фрагментов композита с помощью термостойкого клея.

#### Литература

1. Самоквасова, Ю.Н. Методика выбора конструкционных материалов для задач экранирования электронных средств / Ю.Н. Самоквасова, М.А. Ромащенко // Вестник воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8, № 5. – С. 48–50.
2. Радиоэкранирующие модульные конструкции на основе порошкообразных материалов / под ред. Л.М. Лынькова. – Минск: Бестпринт, 2013. – 184 с.
- 3 Акбашев, Б.Б. Защита объектов телекоммуникаций от электромагнитных воздействий / Б.Б. Акбашев, Н.В. Балюк, Л.Н. Кечиев. – М.: Грифон, 2014. – 472 с.
4. Электродинамические свойства диспергированных гексаферритовых наполнителей и радиопоглощающих покрытий / С.В. Серебрянников [и др.] // Электричество. – 2013. – № 5. – С. 37–40.

УДК 621.315.4/61

### МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКРАНОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИГЛОПРОБИВНОГО МАТЕРИАЛА

Абдухадид Х.Д.А., Прудник А.М., Лыньков Л.М.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Республика Беларусь*

Целью работы является разработка экранов электромагнитного излучения на основе иглопробивного материала для повышения электромагнитной безопасности человека и среды его обитания, решения вопросов защиты информации и электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств.

Для решения поставленной задачи были подготовлены две группы экспериментальных образцов экранов электромагнитного излучения на основе иглопробивного материала. Первая группа имела покрытие из клея на основе бутадиенстирольного каучука с порошкообразным титаномагнетитом, а вторая группа имела покрытие из огнезащитного состава с порошкообразным титаномагнетитом.

Толщина образцов в обеих группах была по 4,3 мм, а содержание порошкообразного материала составляло 30 и 50%, соответственно.

Измерения механических характеристик образцов экранов электромагнитного излучения производили в соответствии с [1]. Для испытания использовались разрывные машины с относительной погрешностью измерения силы  $\pm 1\%$ .

Образцы закрепляли в зажимах разрывной

машины, не касаясь его испытуемой части, с силой натяжения не более 0,3 Н так, чтобы он не скользил во время испытания и чтобы прилагаемая сила имела направление, параллельное его краям. Испытания проводили в машинном и поперечном направлениях. Результаты испытаний образцов, разорвавшихся у кромок зажимов, или сместившихся при испытании не учитывали.

Разрушающее усилие  $F$  определяли средним арифметическим значением результатов десяти измерений в машинном и поперечном направлениях. Разрушающее усилие округляли с точностью до 0,1 Н при значении до 50 Н, до 1 Н при значениях 50...500 Н, 5 Н при значениях 500...1000 Н, 10 Н при значениях свыше 1000 Н. Относительная погрешность определения разрушающего усилия при растяжении не превысила  $\pm 4\%$  при доверительной вероятности 0,95.

Удельное сопротивление разрыву  $F_{уд}$ , кН/м, вычисляли по формуле  $F_{уд} = F / b$ , где  $F$  – разрушающее усилие, Н;  $b$  – ширина образца, мм.

Индекс прочности при растяжении  $I_F$ , Н·м/г, вычисляли по формуле  $I_F = (F_{уд} / m_a) 10^3$ , где  $F$  – удельное сопротивление разрыву, кН/м;  $m_a$  – масса материала площадью 1 м<sup>2</sup>, г.