

- Sputtering // Plasma Science & Technology, vol. 8, No. 3, May 2006. P. 337–343.
4. Bartzsch H., Frach P., Goedicke K., Gottfried Chr., Different pulse techniques for stationary reactive sputtering with double ring magnetron // Surface and Coatings Technology № 120–121, 1999. P. 723–727.
  5. Kouznetsov V., Macak K., Schneider J. M., Helmersson U., Petrov I., A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities // Surface and Coatings Technology № 122, 1999. P. 290–293.
  6. Brauer G., Ruske M., Szczyrbrowski J., Teschner G., Zmely A., Mid frequency sputtering with TwinMag-a survey of recent results // Vacuum, vol. 51, No. 4, 1998. P. 655–659.
  7. Yeom G. E., Tornton J. A., Kushner M. J. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65 (10). P. 3816–3824.
  8. Minea T. M., Bretagne J., Gousset G., Magne L., Pagnon D., Touzeau M., PIC-MCC simulation of a r.f. planar magnetron discharge and comparison with experiment // Surface and Coatings Technology V. 116–119, 1999. P. 558–563.
  9. Makabe T., Yagisawa T., Numerical Modeling of RF Magnetron Sputtering with Metallic or Dielectric Target // Materials Science Forum Vol. 555, 2007.
  10. Kratzsch A., Ulrich S., Leiste H., Stuber M., Holleck H., Influence of the process gas, gas pressure, r.f. power and geometrical arrangement on the magnetron plasma parameters for various thin film materials of the systems TiMN and BMCMN // Surface and Coatings Technology № 116–119, 1999. P. 949–955.

*Н. В. Колбун, Т. А. Пулко*

### **Исследование экранирующих свойств негерметизированных силикагелевых материалов**

Радиопоглощающие материалы нашли широкое применение в различных отраслях науки и техники. При разработке конструкций экранов или поглотителей электромагнитных волн используются различные среды, обладающие способностью отражать или поглощать электромагнитные излучения в определенном диапазоне частот. С учетом развития современных радиоэлектронных средств, целесообразным является разработка поглощающих материалов с высокой эффективностью как в видимом и ближнем инфракрасном, так и в радиочастотном диапазонах длин волн [1].

Вода, как известно, является эффективным поглотителем ЭМИ в широком диапазоне длин волн. Силикагель обладает высокими адсорбционными свойствами и даже в нормальных условиях содержит до 20–30 % воды, в соответствии с чем, применение такого материала для создания поглотителей ЭМИ радиочастотного диапазона на основе воды является перспективным [2]. Силикагель - высушенный гель поликремневой кислоты, твердый гидрофильный сорбент. По химическому составу силикагель – двуокись кремния  $\text{SiO}_2$  (кремнезем), по структуре – высокопористое тело, образованное мельчайшими сросшимися сферическими частицами. Адсорбционная способность силикагеля обусловлена наличием на его поверхности силанольных групп  $\text{Si-OH}$ , способных к образованию водородных связей с молекулами сорбата.

Проводимые ранее исследования показали, что композиционный материал на основе молотого силикагеля в силиконовом связующем позволяет получить ослабление и коэффициент отражения ЭМИ 1,9...2,3 дБ и –11,2...–12,7 дБ соответственно в диапазоне частот 8...12 ГГц [3]. Регулированием влагосодержания силикагеля от 20 % до 55 % изменяется величина ослабления в пределах 5...20 дБ, и коэффициента отражения ЭМИ в пределах –12,0...–5,1 дБ. Однослойные композиты на основе гранулированных силикагелевых материалов с различными включениями в силиконовом связующем обладают ослаблением ЭМИ в пределах 1,6...4,0 дБ и коэффициентом отражения электромагнитных волн –9,0...–15,0 дБ в частотном диапазоне 8...12 ГГц, и могут быть использованы для создания средств защиты радиоэлектронных средств от ЭМИ [4]. Исследования динамики изменения влагосодержания материалов показали, что у негерметизированных образцов влагосодержание значительно снижается при комнатной температуре за краткое время (48 ч.). Естественное испарение влаги из пропитанных материалов при обычной комнатной температуре приводит только к разрушению физических связей молекул воды с поверхностью силикагеля, нарушение химических связей возможно при термическом или химическом воздействии. С помощью герметизации процесс испарения влаги из пропитанных материалов замедляется, при этом, как показали исследования, снижение концентрации влаги при использовании герметизации в основном определяется проницаемостью герметизирующего материала [5].

Целью данной работы является получение поглощающего композиционного материала с низким коэффициентом отражения ЭМИ в диапазоне СВЧ. Для этого были исследованы образцы из непропитанного гранулированного силикагеля без использования герметизирующего внешнего слоя. На

диэлектрической подложке толщиной 2 мм закреплялись гранулы силикагеля диаметром 2–3 мм посредством двух связующих: жидкого стекла (образец № 1) и водостойкого полиуретана (образец № 2), выбранных вследствие их различных физико-химических свойств. Гранулы силикагеля укладывались в плотные ряды. Вследствие сферической формы гранул, поверхность образца, обращенная к излучателю, имеет геометрически неровную форму, для создания условий дополнительного рассеивания ЭМВ на границе раздела свободного пространства и композитного материала. Методом скалярного анализа цепей проводилось исследование ослабления и коэффициента отражения электромагнитного излучения негерметизированным гранулированным силикагелем. Результаты измерений показаны на рис. 1.

Отсутствие герметизирующего слоя позволяет силикагелю в естественных условиях адсорбировать влагу из окружающего воздуха, увеличивая тем самым свою поглощающую ЭМИ способность. Как показывают результаты эксперимента (рис. 1) величина ослабления электромагнитной энергии составляет 3,8...5,15 дБ. Показатели коэффициента отражения ЭМИ находятся в пределах –12,0...–7,0 дБ. Установка металлического отражателя за измеряемыми образцами позволяет снизить значения коэффициента отражения ЭМИ на 2 дБ, вследствие отражения ЭМВ от металлической поверхности отражателя и ее дополнительного рассеивания при распространении в обратном направлении в слое силикагеля.

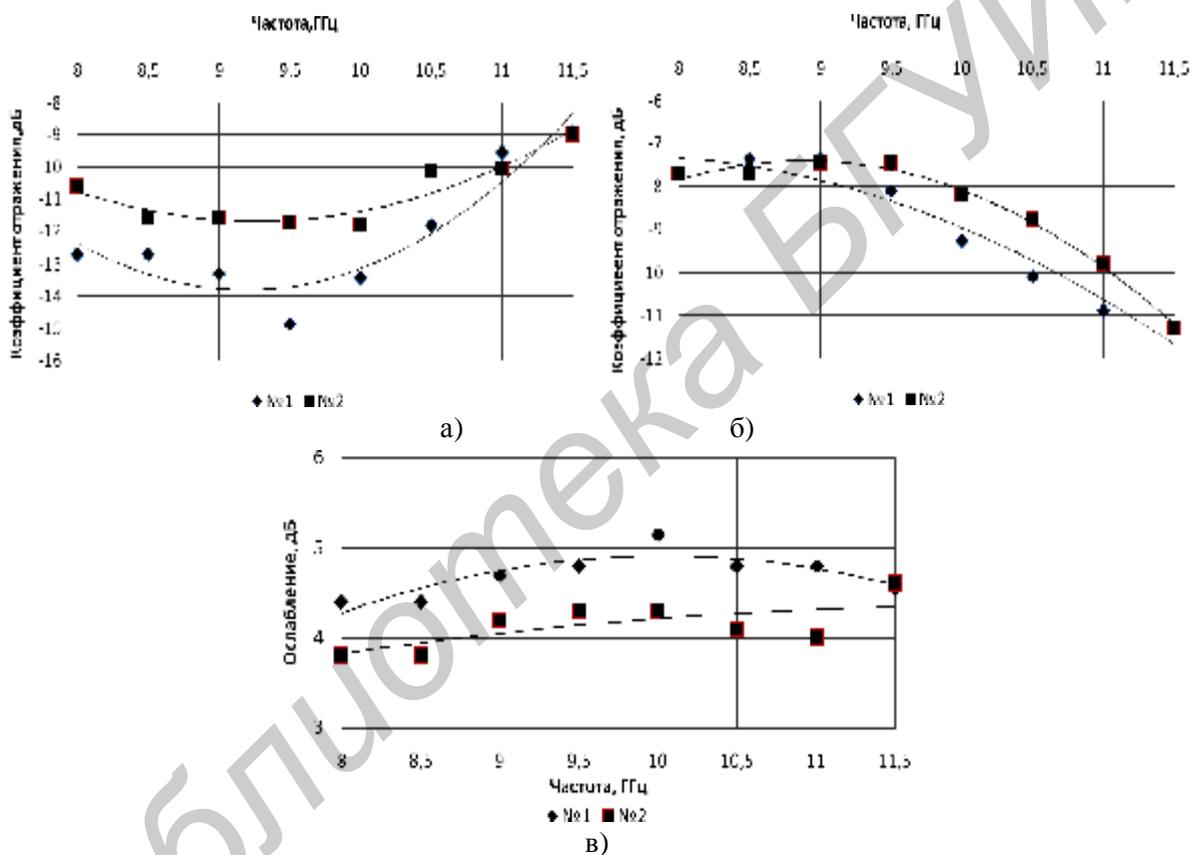


Рис. 1. Экранирующие характеристики

а) коэффициент отражения ЭМИ образцами без металлического отражателя; б) коэффициент отражения ЭМИ с металлическим отражателем; в) ослабление ЭМИ в диапазоне 8...11,5 ГГц – непропитанного гранулированного силикагеля без герметизации с различными связующими: 1 – жидкое стекло; 2 – водостойкий полиуретан

При воздействии на исследуемые образцы ЭМИ происходит преломление ЭМВ от геометрически неровной поверхности гранул, а также рассеивание одной части ЭМЭ на границе раздела двух сред и поглощение другой в составе композита. Вследствие этого происходит снижение коэффициента отражения ЭМИ полученного композиционного материала.

### Литература

1. Гибкие конструкции экранов электромагнитного излучения / Л. М. Лыньков [и др.]; под ред. Л. М. Лынькова. – Мн. : БГУИР, 2000. – 284 с.
2. Колбун, Н. В. Исследование состояния влаги в пористых средах на основе силикагеля при их низкотемпературной обработке / Н. В. Колбун, Фан Н. Занг, Л. М. Лыньков // Доклады БГУИР. – 2005. – № 1. – С. 74–77.

3. Поглотитель электромагнитного излучения : пат. 1516 РБ, МПК Н 01 Q 17/00 / Л. М. Лыньков, Т. В. Борботько, Н. В. Колбун – № u20040015 ; заявл. 14.01.2004 ; опубл. 30.09.2004. // Официальный бюллетень / Нац. центр інтэкт. уласнасці. – 2004. – № 3. – С. 267. Официальный бюллетень. № 3. – 2004. – С. 267.
4. Занг, Ф. Н. Электромагнитные свойства водосодержащего силикагеля / Ф. Н. Занг, Н. В. Колбун // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств, Т. II. : сб. материалов IV Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств», Новополоцк, 25–26 мая 2006 г. – Новополоцк, 2006. – С. 130–134.
5. Колбун, Н. В. Методы герметизации экранов ЭМИ на основе жидкостносодержащих волокнистых материалов / Н. В. Колбун, Фан Н. Занг // Известие Белорусской инженерной академии. – 2004. – № 2 (18)/2. – С. 158–159.

***В. В. Колос, М. И. Маркевич, А. М. Чапланов***

### **Структура и электрофизические свойства тонких пленок силицидов титана при импульсной фотонной обработке**

Одним из важных направлений физики твердого тела является разработка новых методов синтеза перспективных материалов с заданными структурно-чувствительными свойствами [1–4].

Как правило, твердофазное взаимодействие лимитируется диффузией [5–7]. Поэтому основные усилия при твердофазном синтезе материалов направлены на ускорение или замедление диффузионных процессов. Это может осуществляться за счет высокой степени гомогенизации компонентов в исходных реакционных смесях.

Другим подходом к решению таких задач является использование различных методов воздействия на твердофазные системы, которые активируют твердофазную реакцию синтеза материалов [5–7]. Это может быть ультразвуковая, лазерная, импульсная фотонная обработка и т. д.

Импульсная фотонная обработка позволяет решать широкий круг химических и материаловедческих задач, таких, как синтез пленок дисилицида титана, дисилицида никеля с наноразмерными зернами. В данном случае можно достаточно точно контролировать структурные и электрофизические свойства образующихся пленок за счет изменения параметров импульсной фотонной обработки.

Особенности импульсной фотонной обработки изучены для ограниченного числа систем. В ряде работ установлено, что при импульсной фотонной обработке в пленках различных металлов создается высокая концентрация точечных дефектов, таких как вакансии и бивакансии [8–9].

Такое изменение реальной структуры тонких пленок приводит к накоплению энергии в кристаллической решетке в виде дефектов и снижению энергии активации твердофазной реакции.

В данной работе исследовались структурно-фазовые превращения, происходящие в системе TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si при импульсной фотонной обработке.

При изготовлении исследуемой системы проводилась химическая очистка подложки кремния в буферном травителе на основе HF, затем в едином вакуумном цикле пластины кремния подвергались ВЧ травлению в атмосфере аргона на глубину 5 нм.

В последующем на подложку кремния имеющего ориентацию (001) методом магнетронного нанесения на установке Varian m2i последовательно осаждались пленки титана и нитрида титана.

Быстрый термический отжиг проводился ксеноновыми лампами на установке УОЛП-1М с различными плотностями энергии.

Обработка производилась в вакууме при  $P_{\text{ост.}} = 3,10^{-3}$  Па.

Для обеспечения воспроизводимости технологических результатов на установке предусмотрено автоматическое поддержание заданного уровня энергетической экспозиции на обрабатываемой пластине независимо от колебания напряжения питающей сети и изменения параметров ламп со сроком службы за счет введения обратной связи по излучению ламп.

Реактор, применяемый для обработки TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si, был изготовлен из нержавеющей стали.

Ксеноновые лампы, размещенные внутри реактора, вставлены в кварцевые трубки, наружная поверхность которых покрыта диффузионным отражающим покрытием.

Импульсная фотонная обработка TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si проводилась в вакууме при плотностях энергии 100–370 Дж/см<sup>2</sup>.

Исследования структуры и фазового состава пленок дисилицида титана полученных при импульсной фотонной обработке с различной плотностью мощности системы в TiN/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si проводились методами просвечивающей электронной микроскопии и электронографии на электронном микроскопе JEM – 200СХ.