

УДК 621.382.3

РАДИАЦИОННО, ХИМИЧЕСКИ И ТЕРМИЧЕСКИ СТОЙКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ АЛМАЗА

С. А. Львов¹, д. ф.-м. н. А. Ю. Митягин², д. ф.-м. н. Г. В. Чучева²

¹ООО «УралАлмазИнвест», г. Москва,

²ФирЭ им. В. А. Котельникова РАН, г. Фрязино

Россия

alexandr-mityagin@yandex.ru

Рассмотрены вопросы радиационно, химически и термически стойкой микроэлектронной аппаратуры. Особое внимание уделяется алмазу, который эффективно используется в различных датчиках и системах контроля ионизированного излучения. Показана эффективность системы радиационного контроля на основе алмазного монокристаллического детектора ионизирующих излучений производства «ПТЦ УралАлмазИнвест» для мониторинга ионизирующего излучения космического пространства и для медицинских целей.

Ключевые слова: радиационно стойкий, химически стойкий, термостойкий, датчики, системы ионизированного излучения.

Многие сферы деятельности современного и особенно будущего человечества требуют создания радиационно, химически и термостойкой микроэлектронной аппаратуры, надежно обрабатывающей электрические сигналы в условиях длительного воздействия высокого уровня радиации, агрессивных сред и температуры. Подобная аппаратура необходима для работ: в космическом пространстве; в зонах повышенного радиоактивного загрязнения, после ядерного удара и неконтролируемых выбросов продуктов распада; а также для работ, связанных с ядерным производством и хранением. Существующие в настоящее время элементы микроэлектронных устройств базирующейся в основном на кремнии, который по своим параметрам малоприспособлен для работы в таких условиях. Для решения этой проблемы необходимы термо-, химически- и радиационно стойкие материалы с высокими механическими свойствами. Все эти свойства в совокупности присущи только одному материалу — алмазу, что делает его одним из реальных резервов будущей техники.

Поликристаллический алмаз (полиалмаз) с требуемыми свойствами уже применяют как для изготовления пассивных устройств (теплоотводов, звукопроводов в приборах на поверхностных акустических волнах), так и в качестве полупроводникового материала активных приборов (полевых транзисторов с частотой выше 100 ГГц, детекторов). Конечно, остается немало трудностей, которые необходимо преодолеть для того чтобы подтянуть "алмазную" технологию к уровню, достигнутому хотя бы для карбида кремния. Это и принципиальные проблемы синтеза монокристаллических пластин размером не менее одного дюйма (около 25 мм), и вопросы легирования алмаза. Но, главное, преодолен психологический барьер, и мы наблюдаем превращение алмаза из экзотического для электроники материала в технический.

Химическая стойкость алмазных электронных изделий

Сам алмаз является стойким к любым химическим элементам. Однако при изготовлении электронных изделий в качестве контактов используются металлы, прежде всего золото. Золото также является пассивным элементом и так же не взаимодействует с большинством химических элементов. Основным растворителем золота является "царская водка" (смесь концентрированных азотной и соляной кислот в пропорции 1:3), и сложно представить технологический процесс, в котором использовался бы данный раствор. В качестве контактов часто используется алюминий. Как известно, алюминий покрыт пленкой оксида, которая также препятствует всякому соединению. Однако при контакте с раствором солей аммония, горячими щелочами или в результате амальгамирования, алюминий вы-

ступает как активный металл-восстановитель. Но все это касается сложных химических реакций, которые никогда не используются в электронной технологии.

Термическая стойкость алмазных электронных изделий

Хорошо известно, что алмаз прекрасно выдерживает температуру до 600°C. Естественно, что такие температуры не страшны ни золоту, ни алюминию. Вследствие этого мы не будем пользоваться спецснасткой для проведения климатических испытаний для полупроводниковых изделий из алмаза.

Испытания макетов мощных СВЧ-транзисторов, созданных на гидрированной поверхности алмаза

Были проведены испытания изготовленных транзисторов по определению крутизны характеристики, порогового напряжения и напряжения отсечки, остаточного тока стока, коэффициента усиления по мощности и граничной частоты. Отдельно отметим, что измерения проводились в том числе и при температуре 400°C. В табл. 1 и 2 приведены некоторые из полученных данных.

Таблица 1
Выходная мощность $P_{\text{вых}}$ и коэффициент усиления $K_{\text{ур}}$ макета мощного СВЧ-транзистора DB-8 при двух значениях температуры $T_{\text{раб}}$ на различной частоте

$T_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$	Параметр	Частота, ГГц							
		2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	
24°C	$P_{\text{вых}}, \text{мВт}$	2145	1247	758,5	632,8	521,3	459,8	357,4	
	$K_{\text{ур}}, \text{дБ}$	26,4	23,9	22,1	21,4	20,2	18,8	17,5	
	Параметр	Частота, ГГц							
		9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	
	$P_{\text{вых}}, \text{мВт}$	286,4	212,6	164,9	155,4	144,8	137,2	92,4	
	$K_{\text{ур}}, \text{дБ}$	16,7	15,7	15,2	14,6	13,9	13,2	12,7	
400°C	Параметр	Частота, ГГц							
		2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	
	$P_{\text{вых}}, \text{мВт}$	2436	1945	1153	884,6	713,8	579,3	514,6	
	$K_{\text{ур}}, \text{дБ}$	28,7	25,8	24,1	23,4	22,5	21,8	20,2	
	Параметр	Частота, ГГц							
		9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0	15,0	
	$P_{\text{вых}}, \text{мВт}$	489,2	403,8	355,4	296,3	264,6	220,3	185,8	
	$K_{\text{ур}}, \text{дБ}$	19,3	18,8	17,6	17,1	16,3	15,7	15,5	

Таблица 2
Граничная частота макетов мощных СВЧ-транзисторов при двух значениях температуры $T_{\text{раб}}$

Макет	$T_{\text{раб}}, ^\circ\text{C}$	$K_{\text{ур}}, \text{дБ}$, не менее в диапазоне частот 3,0 — 15,0 ГГц	Граничная частота, ГГц
DB-7	24±3	12,1	101
DB-8		12,7	114
DB-7	400±5	14,3	122
DB-8		15,5	142

Радиационная стойкость алмазных электронных изделий

Обеспечение длительных сроков функционирования аппаратуры в жестких условиях эксплуатации требует изучения, прогнозирования и непрерывного мониторинга воздействия ионизирующих излучений (ИИ), приводящих к отказам, классифицируемым как дозовые и одиночные эффекты. Для реализации этого направления необходимо непосредственное определение количественных характеристик полей ионизирующих излучений в месте установки РЭА, что в свою очередь, требует создания ряда специализированных сенсоров. Сенсоры должны регистрировать как усредненные дозовые нагрузки на РЭА, так и потоки тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ), попадание которых в РЭА приводит к одиночным эффектам сбоев и отказов.

В настоящее время хорошо отработаны и с успехом используются сенсоры для измерения дозовых нагрузок на РЭА. В то же время сенсоры для измерения параметров ТЗЧ находятся еще в стадии экспериментальной отработки. Такая ситуация связана с тем, что к сенсорам для регистрации ТЗЧ предъявляются жесткие требования по радиационной стойкости, они должны обеспечивать регистрацию ТЗЧ в широком диапазоне энергий и при этом быть работоспособными при повышенных и пониженных температурах. Все это приводит к тому, что сенсор ТЗЧ не удается построить на основе кремниевых детекторов.

Алмаз как широкозонный полупроводниковый материал не теряет своих полупроводниковых свойств в диапазоне температур от минус 200 до плюс 600°C и обладает высокой радиационной стойкостью (десятки мегагрей), превосходящей радиационную стойкость кремния на два порядка [1, 2]. В связи с этим представляется перспективным построение сенсоров ТЗЧ на основе алмазных чувствительных элементов.

ООО ПТЦ УралАлмазИнвест совместно с НИИКП и ЛЯР ОИЯИ были проведены экспериментальные исследования макета сенсора ТЗЧ с алмазным датчиком АДИИ-1 производства ООО «ПТЦ «УралАлмазИнвест». Эксперименты проводились на пучках ионов Ne^{+9} Ar^{+15} He^{+54} на канале прикладных исследований циклотрона У-400 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Детекторы типа АДИИ-1 использовали для измерения энергетического спектра и интенсивности потока тяжелых заряженных частиц. Для проверки стабильности параметров детектора АДИИ-1 (энергетическое разрешение 4% по 5,5 МэВ Zn-частицам) было проведено его облучение ионами цинка с энергией 350 МэВ на ускорителе UNILAC в компании GSI (Дармштадт, Германия) [3]. Энергетическое разрешение для ионов составило 100 МэВ (25%) и не изменялось на протяжении всего времени облучения. При этом общая поглощенная доза составила $2 \cdot 10^8$ ион/мм², что в десять раз больше максимальной дозы для Si-детекторов. Эти данные согласуются с аналогичными результатами зарубежных специалистов [4]. Дозиметрическими алмазными детекторами типа АДИИ проводились измерения параметров линейного ускорителя электронов У-31/32 ОНИЛ МИФИ [5, 6].

Порог чувствительности к гамма-излучению детекторов типа АДИИ примерно на три порядка выше порога чувствительности к нейтронам, поэтому данные детекторы удовлетворяют требованиям обеспечения уверенной регистрации нейтронов на фоне гамма-излучения. Экспериментальное подтверждение данного вывода было продемонстрировано при измерениях потоков нейтронов от ²³⁸PuBe источников типа ИБН-8-4 и ИБН-8-7, а также ²⁵²Cf источников типа ИНК-4, ИНК-5 и ИНК-10 [7—9]. Данные для построения калибровочного графика сведены в табл. 3.

Таблица 3

Тип иона	Энергия иона, МэВ	Номер канала центра пика N_{max}	Коэффициент усиления спектрометра $K_{усил}$	$N_{max}/K_{усил}$
He^{+4}	5.48	72	80	0,9
Ne^{+9}	81	264	20	13,2
Ar^{+15}	148	197	10	19,7
He^{+54}	468	173	4,3	40,2

Экспериментальные исследования макета сенсора ТЗЧ, построенного на основе алмазного датчика АДИИ-1, показали, что в диапазоне энергий от 5 до 470 МэВ он обеспечивает измерение плотности потока и энергии ТЗЧ с погрешностями не превышающими, соответственно, $\pm 1\%$ и $\pm 15\%$.

В результате проведенных исследований была показана возможность создания сенсора ТЗЧ на основе алмазного чувствительного элемента для установки на космические аппараты и для мониторинга ионных пучков ускорителей.

Таблица 4

Мощность дозы, измеренная на различных расстояниях от SrY источника электронного излучения

Расстояние, мм	14	18	22	26	30	34	38	42	46
Мощность дозы, отн. ед.	5,53	3,54	2,34	1,78	1,32	1,11	0,84	0,70	0,57

Одно из направлений научных прикладных исследований с помощью детекторов ИИ — это мониторинг радиационных факторов космического пространства. Такие исследования позволят контролировать различные аспекты воздействия ИИ космического происхождения на электронную аппаратуру космической техники, изучать факторы воздействия ИИ на экипаж космических аппаратов и биологические объекты. В связи с этим интересно отметить, что в Европе сейчас создается служба «космической погоды». Ожидается, что потребителями ее услуг станут представители различных сфер деятельности — от министерств обороны до компаний туристического бизнеса и авиаперевозок.

Проведенные в компании Standard Imaging Inc. (США) исследования разработанных алмазных детекторов показали, что их эффективность для измерений гамма-излучения, в т. ч. в медицинских целях. Детекторы уверенно регистрируют гамма излучение с мощностью дозы от 11 сГр/мин и работает в линейном режиме вплоть до 600 сГр/мин. При этом облучение детектора дозой в 85 кГр не ухудшает его характеристики.

Таким образом, экспериментальные исследования показали эффективность рассмотренной системы радиационного контроля на основе алмазного монокристаллического детектора ионизирующих излучений производства «ПТЦ УралАлмазИнвест» для мониторинга ионизирующего излучения космического пространства и для медицинских целей.

Работа выполнена в рамках РФФФ, проект 11-07-00288.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Алтухов А.А., Афанасьев М.С., Зяблюк К.Н. и др. Полупроводниковые радиационно, химически и термостойкие электронные элементы на основе алмаза // Тр. XV11 Междунар. науч.-техн. конф. «Высокие технологии в промышленности России». — Россия, Москва. — 2011. — С.131—138.
2. Altukhov A.A., Afanasiev M.S., Kvaskov V.B. et. al. // Application of diamond in high technology. Inorganic materials. — 2004. — Vol.40, suppl.1. — P. S50 — S70.
3. Gulyaev Yu., Altukhov A., Eremin N.V. et. al. Radiation intensity detectors based on natural diamond // Physica Status Solidi(a). — 2001. — N 2. — P.10—12.
4. W.de Boer, J. Bol, A. Furgeri et al. Radiation hardness of diamond and silicon sensors compared // Invited talk at the Hasselt Diamond Workshop. — 2007. — P.3009.
5. Кирилин Н.М., Герасимов О.Ф. и др. Измерение характеристик линейного ускорителя электронов с помощью алмазных детекторов // Тезисы докладов IX международного совещания «Проблемы прикладной спектроскопии и радиометрии». — 2005. — Россия, г. Заречный. — Изд. ФГУП НИКИ РТ. — С. 3—4.
6. Герасимов О.Ф., Кирилин Н.М. и др. Использование алмазных детекторов ионизирующих излучений для аттестации линейного ускорителя электронов // Сб. трудов ГУ 32 ГНИИИ МО РФ. — Россия, г. Мытищи, Московской обл., 2006. — Вып. 29. — С. 149—156
7. Алтухов А.А., Герасимов А.О., Кирилин Н.М. и др. Программно-аппаратный комплекс для спектроскопии быстрых нейтронов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. — 2007. — Вып. 3—4.
8. Алтухов А.А., Герасимов О.Ф., Кирилин Н.М., Синников Л.Л. Алмазная радиометрия в нейтронно-активационном методе измерения флюенса нейтронов // Сборник «Радиационная стойкость электронных систем — Стойкость-2005». — Россия, Москва, МИФИ, 2005. — Вып. 8. — С. 249—250.
9. Алтухов А.А., Герасимов О.Ф., Кирилин Н.М. и др. Спектрометрия 14 МэВ нейтронов по (n, α)-реакции в алмазном детекторе // В сборнике «Радиационная стойкость электронных систем — Стойкость-2006». — Россия, Москва, МИФИ, 2006. — Вып. 9. — С. 229—230.

S. A. Lvov, A. Yu. Mityagin, G. V. Chucheva

Radiation, chemically and thermally stable diamond-based electronic components.

The paper deals with problems of radiation, chemically and thermally stable microelectronic devices. Particular attention is paid to the diamond, which is effectively used in a variety of sensors and control systems for ionized radiation. Also is shown the efficiency of the radiation monitoring system based on single-crystal diamond ionizing radiation detectors of "JSC UralAlmazInvest" production for ionizing radiation monitoring of outer space and for medical purposes.

Keywords: *chemical, heat, radiation-resistant, sensors, systems, ionized radiation.*