

УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ РАБОЧЕГО СЛОЯ НА FE-NI ПЛЕНКАХ В АВАРИЙНЫХ БОРТОВЫХ НАКОПИТЕЛЯХ ИНФОРМАЦИИ

© 2004 А.М. Горовой¹, А.Н. Малов², Д.А. Сафронов¹, М.В. Шмидт¹

¹ Иркутский военный авиационный инженерный институт

² Иркутский государственный технический университет.

Рассматриваются носители информации, в составе рабочего слоя которых содержатся тонкие пленки полиморфных железоникелевых сплавов, имеющие две различные кристаллографические модификации этих сплавов, и способные в широком диапазоне температур находиться в устойчивом метастабильном состоянии как с объемноцентрированной, так и с гранецентрированной кубической решеткой. Магнитные и термогальванические накопители информации на основе полиморфных железоникелевых пленок работают на основе зависимости намагниченности и термоэлектрических свойств от их фазового состава. Рассматриваются физико-технологические факторы (химический состав, толщина пленки, концентрационная однородность), влияющие на динамический диапазон рабочего слоя.

Введение

Эксплуатируемые в настоящее время аварийные бортовые устройства регистрации полётных данных предназначены для записи параметров, совокупная информация о которых является необходимой и достаточной для установления истиной причины авиационного происшествия. В связи с этим к аварийным бортовым устройствам регистрации полётных данных предъявляются особые требования, связанные с защитой их от механических нагрузок, высоких температур, проникновения воды и агрессивных жидкостей во внутреннюю полость защитного контейнера [1]. При возникновении авиационного происшествия и повреждении корпуса аварийного бортового устройства регистрации полётных данных информация может частично или полностью уничтожиться при разрушении носителя данных. Поэтому носитель должен обладать устойчивостью к неблагоприятным факторам для максимальной защиты информации [2].

У существующих аварийных бортовых устройств регистрации полётных данных защитные свойства носителей при повреждении корпуса в случае авиационного происшествия недостаточно надёжны, следствием чего является частичное или полное разру-

шение зарегистрированных данных. Магнитные носители на полиэтилентерефталатной основе, используемые в магнитных системах регистрации параметров (МСРП-64), разрушаются при воздействии воды, агрессивных жидкостей и нагрева до температуры 245°C и выше [2]. В твердотельных носителях используемых в принципиально новых и современных аварийных бортовых устройствах регистрации "Карат-Б", информация разрушается при повреждении платы, микросхем и их паяного соединения, при нарушении герметичности микросхем и воздействия на них агрессивных жидкостей, при нагреве свыше 125°C [2] и радиационном воздействии [3].

Повысить стойкость к дестабилизирующим факторам и сохранность записанной информации в аварийных бортовых устройствах регистрации позволят разрабатываемые носители информации с рабочим слоем на основе полиморфного железоникелевого сплава [4–7].

Запись информации на основе полиморфного железоникелевого сплава

Рабочий слой разрабатываемого носителя информации на основе полиморфного железоникелевого сплава, по сравнению с

существующими аналогами, позволит повысить плотность записи, осуществлять считывание сигнала в аналоговой форме, а также надежно сохранять зарегистрированную информацию при воздействии на него: температур в диапазоне от -100 до $+350^\circ\text{C}$; ионизирующего излучения; сильного электромагнитного поля; механических воздействий.

Одной из важных характеристик разрабатываемых носителей информации является величина динамического диапазона считываемого сигнала. Исследования, проведенные на железоникелевых пленках, свидетельствуют о том, что на динамический диапазон может влиять ряд факторов, которые следует учитывать при разработке физико-технологических основ создания носителей информации.

Тонкие пленки, исследуемые в данной работе, были изготовлены методом термической конденсации в вакууме железоникелевых сплавов, обогащённых изотопом Fe^{57} , на подложки из ситалла и аморфного кварца. Полученные образцы исследовались методами магнитометрии, ядерного гамма-резонанса и рентгеноструктурного анализа. В исходном после конденсации состоянии кристаллическая решетка пленок соответствовала α -фазе с неоднородным, как будет показано в работе, распределением атомов железа и никеля.

Принципы работы носителей информации, в составе рабочего слоя которых содержатся тонкие пленки полиморфных железоникелевых сплавов, основаны на различии физических свойств двух кристаллографических модификаций этих сплавов, способных в широком диапазоне температур находиться в устойчивом метастабильном состоянии как с объемноцентрированной, так и с гранецентрированной кубической решеткой (α - и γ - фазы соответственно). В основе разработки физико-технологических принципов создания магнитных и термогальванических носителей на полиморфных железоникелевых пленках лежит зависимость намагниченности и термоэлектрических свойств от их фазового состава.

В полиморфных железоникелевых пленках γ -фаза образуется в результате мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, протекающего при низкотемпературной обработке. По своему

характеру данное превращение в пленках, содержащих от 25 до 30 процентов никеля, является незавершенным, то есть при охлаждении исследуемых образцов до -196°C в зависимости от химического состава в них присутствует то или иное остаточное количество фазы с гранецентрированной кубической решеткой $\gamma_{\text{ост}}$. В свою очередь, от количества образовавшейся при $\gamma \rightarrow \alpha$ превращении α -фазы зависит различие магнитных и термогальванических свойств информационных ячеек, состоящих из гетерофазной ($\alpha + \gamma_{\text{ост}}$) - структуры и ячеек с чистой γ -фазой. От того, насколько велико это различие, будет зависеть такая важная эксплуатационная характеристика носителя информации, как динамический диапазон величины считываемого сигнала. Поэтому указанный динамический диапазон в конечном счете будет определяться степенью полноты $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения, зависящей от таких факторов, как химический состав, толщина пленок, а также степень однородности распределения атомов железа и никеля в субмикророботах кристаллической решетки. Их влиянию на протекание $\gamma \rightarrow \alpha$ превращений в тонких пленках сплава 28%Ni-72%Fe посвящен анализ экспериментальных результатов, представленных в настоящей работе.

Химический состав железоникелевых пленок

Концентрационный интервал железоникелевых сплавов, которые могут быть использованы для изготовления рабочего слоя носителей информации магнитного и термогальванического типов, довольно узок и составляет 25%-30% никеля (остальное железо). Это связано с тем, что в пленках, содержащих менее 25% никеля потеря устойчивости высокотемпературной γ -фазы у пленок, толщина которых превышает 0,5 мкм., возникает в области температур от 0°C и выше. В пленочных образцах меньшей толщины, где γ -фаза может быть устойчивой до -100°C , невозможно получить достаточно большое количество α -фазы, поскольку степень подавления $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в них увеличивается с уменьшением толщины пленок. Это в свою очередь будет уменьшать динамический

диапазон сигналов, считываемых как с магнитных, так и с термогальванических носителей. Кроме того, ограничение со стороны низких температур области существования в пленках высокотемпературной γ -фазы ограничит снизу область температур сохранения записанной информации, что неприемлемо для разрабатываемых носителей специального назначения.

Использование для изготовления рабочего слоя носителей пленок с концентрацией никеля более 30% также нецелесообразно, поскольку динамический диапазон сигналов, считываемых с носителей информации термогальванического и магнитного типов будет лимитироваться количеством α -фазы, получаемой в результате $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. В таких образцах толщиной 1–1,5 мкм практически невозможно получить более 70% α -фазы, охлаждая пленки до -196°C . Уменьшение толщины пленок будет вести к еще большей незавершенности $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и, как следствие этого, к уменьшению величины динамического диапазона считываемых сигналов.

Как было отмечено, принцип работы магнитных носителей основывается на различии намагниченности информационных ячеек, имеющих разный тип кристаллической решетки. Перевод из α - в γ -фазу отдельных ячеек с последующим их намагничиванием, в соответствии с записываемой информацией, формирует в них высокомагнитное (для α -ячеек) и слабомагнитное или парамагнитное (для γ -ячеек) состояние. Осуществление такой записи возможно путем локального лазерного отжига ячеек информационной дорожки, приводящего к $\alpha \rightarrow \gamma$ превращению [8].

Для магнитных носителей информации величина динамического диапазона при считывании будет определяться разницей в величине остаточной намагниченности α - и γ -информационных ячеек $J_{r\alpha} - J_{r\gamma}$. В области концентраций от 25% до 30% никеля остаточная намагниченность в α -тонких пленках изменяется от 750 Гс до 700 Гс. В γ -тонких пленках с уменьшением концентрации никеля от 30% до 28% J_r изменяется от 100 Гс до нуля. С меньшим содержанием никеля γ -пленки парамагнитные. Поэтому для достижения

максимальной величины динамического диапазона считываемого с магнитного носителя сигнала наиболее целесообразным представляется использование в качестве материала информационной дорожки тонких пленок сплавов, содержащих не более 28% никеля.

Принцип работы термогальванического носителя информации основан на регистрации сигналов термо-ЭДС при нагреве границы раздела тонкой пленки железоникелевого сплава с тонкой пленкой другого проводника, например никеля или меди. Последовательное чередование тонких пленок FeNi-Me-FeNi-...-FeNi (где Me- металл, например, медь, никель ...), находящихся в электрическом контакте, составляет информационную дорожку термогальванического носителя. Изменением абсолютной величины считываемого с дорожки сигнала в случае чередования контактных пар γ FeNi-Me и α FeNi-Me будет определяться величина динамического диапазона сигнала. Для DDT=100К величина динамического диапазона для указанных материалов будет соответствовать $\approx 3,2\text{мВ}/100\text{К}$ [9].

Поскольку $\gamma \rightarrow \alpha$ превращение в пленках исследуемых железоникелевых сплавов является незавершенным, то величина динамического диапазона сигналов, считываемых с информационной дорожки термогальванических носителей информации будет зависеть от количества остаточной γ -фазы в контактной паре α FeNi-Me. Количество $\gamma_{\text{ост}}$ при этом находится в прямо пропорциональной зависимости от содержания никеля в железоникелевых пленках. Используя для изготовления информационной дорожки сплавы, содержащие не более 28% никеля, можно получать в α FeNi-участках содержание α -фазы до 90%, а следовательно и достаточно большую величину динамического диапазона считываемого сигнала.

Таким образом, наиболее приемлемым с точки зрения реализации максимального динамического диапазона считываемых сигналов, а также установления достаточно широкого диапазона температур сохранения записанной информации представляется использование в рассматриваемых носителях

[4–7, 10, 11] тонких пленок, содержащих не более 28% никеля.

Толщина пленок

Наряду с химическим составом, важным фактором, определяющим полноту превращения в железоникелевых пленок, а, следовательно, и динамический диапазон сигналов, считываемых с носителей информации, является их толщина. Исследования, проведенные на пленках сплава 28% Ni - 72% Fe свидетельствует о том, что с увеличением толщины пленок повышается температура потери устойчивости γ -фазы и возрастает степень полноты $\gamma \rightarrow \alpha$ превращений (рис. 1).

Эти результаты необходимо учитывать для определения величины динамического диапазона считываемых сигналов. Согласно данным, показывающим степень полноты $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения при -196°C , а также магнитным характеристикам пленок, абсолютная величина изменения диапазона остаточной намагниченности в носителях магнитного типа может изменяться от 140 Гс до 660 Гс при изменении толщины пленок от 0,1 мкм до 1,2 мкм. Для термогальванических носителей информации абсолютное изменение величины сигнала, считываемого непосредственно с дорожки, будет находиться в пределах 0,6–2,9 мВ.

Температура потери устойчивости γ -фазы, определяющая нижнюю температурную границу сохранения информации, будет

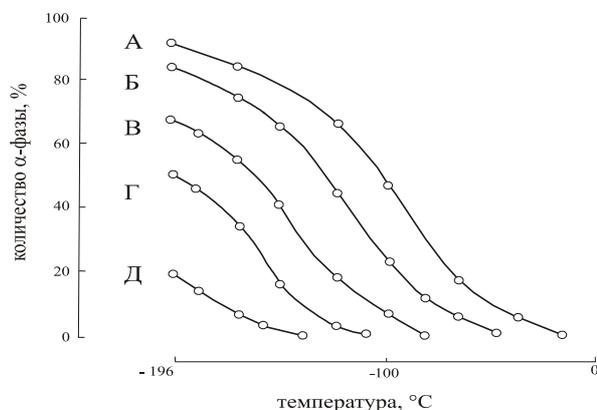


Рис. 1. Кинетика $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в плёнках сплава 28%Ni-72%Fe после ступенчатого охлаждения. Толщина пленок: А – 0,1 мкм, Б – 0,2 мкм, В – 0,4 мкм, Г – 0,8 мкм, Д – 1,2 мкм

при этом изменяться от -130 до -10°C . Это в равной степени относится как к магнитным, так и к термогальваническим носителям. Для аварийных бортовых устройств регистрации полётных данных оптимальная толщина железоникелевых фрагментов информационной дорожки, согласно данным рис. 1, должна быть не более 0,4 мкм.

Однородность распределений атомов в кристаллической решётке

Полнота $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в железоникелевых плёнках, определяющая величину динамического диапазона сигналов, считываемых с накопителей информации магнитного и термогальванического типов, во многом определяется особенностями распределения атомов железа и никеля в узлах кристаллической решетки. Изучение процессов приближения к равновесному состоянию в полиморфных железоникелевых пленках показало, что состоянию с низким уровнем свободной энергии соответствует неоднородное распределение атомов железа и никеля в решетке [12]. При этом как в объемцентрированной, так и в гранецентрированной кубической решетке образуются области, обогащенные и обедненные одним из компонентов сплава относительно средней концентрации.

Условия получения пленок, когда происходит послойное формирование конденсата в условиях высокой диффузионной подвижности атомов, могут способствовать образованию концентрационных неоднородностей в субмикрообъемах кристаллической решетки. Об этом свидетельствуют данные, полученные методами ядерного гамма-резонанса и магнитометрии. Резонансный спектр, снятый с плёнки 28%Ni-72%Fe после её конденсации и высокоскоростного “переброса” в γ -фазу (рис.2А) состоит из двух систем линий. Системе линий с $H_{\text{св}} = 288\text{кЭ}$ соответствуют γ -субмикробласти с концентрацией никеля около 40%. Центральная одиночная линия свидетельствует об образовании в пленке парамагнитных γ -областей, обедненных никелем относительно средней концентрации.

Подтверждением концентрационному распаду гамма-твердого раствора являются

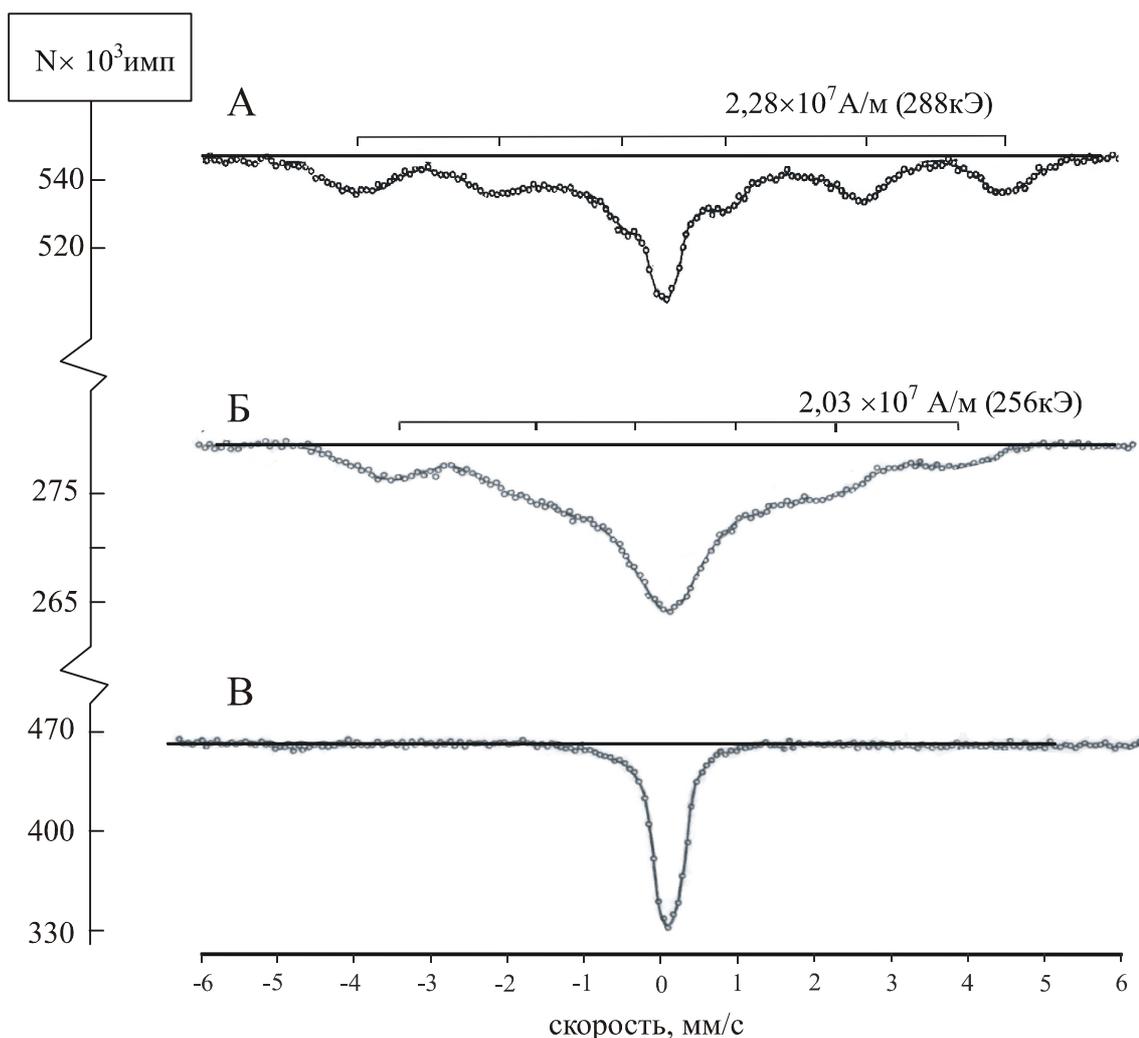


Рис. 2 ЯГР-спектры плёнок сплава 28%Ni-72%Fe после конденсации на подогретую подложку и отжига при 680°C:

А – в течение 2 мин, Б – в течение 15 мин, В – в течение 60 мин

результаты измерения намагниченности этих плёнок. Высокоскоростной отжиг сконденсированных образцов с последующей их закалкой на комнатную температуру зафиксировал неоднородное распределение атомов в α -фазе сконденсированной пленки. Благодаря образовавшимся в результате $\alpha \rightarrow \gamma$ превращения субмикрообластям с высоким содержанием никеля, намагниченность плёнок составляла 270 Гс (рис. 3). Гомогенный же сплав 28%Ni-72%Fe при комнатной температуре имеет состояние, близкое к парамагнитному, о чем свидетельствуют данные, полученные после часового отжига плёнок при 680°C (рис. 2В, рис. 3).

Последующий изотермический отжиг концентрационно неоднородных образцов приводит к выравниванию химического со-

става по объёму пленки. Уже после 15-минутной выдержки при 680°C в ЯГР-спектре образуется система линий сверхтонкого магнитного расщепления с $H_{св} = 256$ кЭ, соответствующая областям с концентрацией никеля $\sim 35\%$ (Рис. 2Б). Намагниченность такой пленки уменьшается до ~ 220 Гс (рис. 3). В результате часового изотермического отжига происходит полная гомогенизация плёнок. При этом в резонансном спектре содержится центральная одиночная линия, соответствующая парамагнитной γ -фазе (Рис. 2В), а намагниченность образцов практически равна нулю в пределах ошибки, соответствующей погрешности измерений (Рис. 3).

Результаты исследований особенностей атомного распределения в железоникелевых плёнках позволили определить влияние сте-

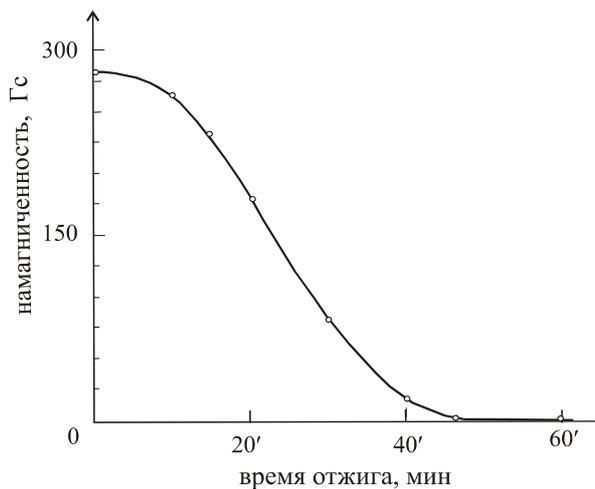


Рис. 3. Изменение намагниченности концентрационно неоднородных пленок сплава 28%Ni-72%Fe после гомогенизирующих отжигов при 680°C

пени их концентрационной однородности на полноту $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения. С этой целью были проведены исследования на гомогенных плёнках и на образцах с разной степенью концентрационного расслоения. Для этого были выбраны плёнки, с которых снимались спектры ЯГР, представленные на рисунке 2. Охлаждение их до -196°C привело к $\gamma \rightarrow \alpha$ превращению, полнота которого соответствовала степени однородности распределения атомов железа и никеля в узлах кристаллической решётки, о чем свидетельствуют данные представленные на рисунке 4.

Из анализа дифрактограмм следует, что концентрационные неоднородности являются одним из факторов, подавляющих $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения и снижающих его полноту, а следовательно уменьшающих величину динамического диапазона сигналов, считываемых с носителей информации, в составе рабочего слоя которых содержатся тонкие плёнки полиморфных железоникелевых сплавов.

Заключение.

При разработке и создании аварийных бортовых устройств регистрации необходимо учитывать экстремальные условия, в которых при авиационном происшествии может находиться защитный контейнер с носителем информации. В зависимости от степени повреждения защитного контейнера аварийного бортового устройства регистрации количество потерянной информации будет зависеть от защитных свойств самого носи-

теля. Использование рабочего слоя носителя из полиморфного железоникелевого сплава позволит увеличить плотность записи информации и реализовать возможность её считывания в аналоговой форме. Воздействие дестабилизирующих факторов на рабочий слой носителя в виде температур от -100°C до $+350^\circ\text{C}$, ионизирующего излучения, сильного электромагнитного поля и механических воздействий не должно влиять на качество зарегистрированной информации. В случае повреждения рабочего слоя качество считываемой и подлежащей расшифровке информации будет зависеть от величины динамического диапазона сигнала. Для реализации максимального динамического диапазона при разработке физико-технологических основ создания носителя необходимо учитывать параметры, влияющие на величину динамического диапазона. Поэтому в зависимости от того, в каких условиях будет эксплуатироваться бортовое устройство регистрации полётных данных, необходимо учитывать факторы, влияющие на величину динамического диапазона, рассмотренные в настоящей работе.

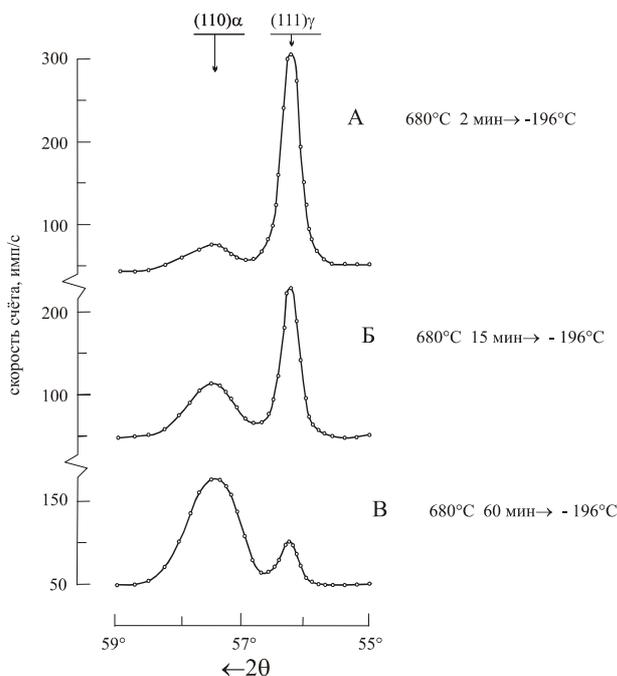


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы пленок сплава 28%Ni-72%Fe после конденсации на подогретую подложку и дальнейших термообработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авиационные приборы. Москва: Военное издательство, 1992.
2. Проблемы безопасности полетов. Вып. 6. Москва: Военное издательство, 1999.
3. Чулков И.В., Левин В.В., Ануфрейчик К.В и др. Результаты радиационных исследований накопителей SP25BI-32 фирмы SANDISK.. Институт космических исследований. ЭНПО “Специализированные электронные системы” // <http://lex.iki.rssi.ru/papers/radisipitania/rad2.pdf> (06 июня 2003).
4. Gorovoi A.M., Malov A.N. Laser data recording and reading on the base of thermogalvanic storage effect // Proc. SPIE, 2003. Vol. 5129.
5. Gorovoi A.M., Malov A.N. Thermogalvanic laser re-cording and reading data storage device // Proc. SPIE, 2003, Vol. 5134.
6. Горовой А.М., Малов А.Н. Запись информации на основе полиморфизма железоникелевых сплавов // Компьютерная оптика. 2003. Вып. 25.
7. Горовой А.М., Малов А.Н. Запоминающие устройства с лазерной записью и термогальваническим считыванием информации // Компьютерная оптика. 2003. Вып. 25, с.109-111
8. Ушаков А.И., Горовой А.М., Казаков В.Г. Фазовый переход в Fe-Ni пленках под действием лазерного облучения // Физика металлов и металловедение. 1980. Т. 50.
9. Моржуев Ю.В., Горовой А.М. Электрические свойства информационного слоя термогальванических носителей информации // Материалы XIII Всероссийской научной конференции “Проблемы повышения боевого применения, технической эксплуатации и обеспечения безопасности полётов летательных аппаратов с учётом климатогеографических условий Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока. Часть II.” Иркутск: ИВАИИ. 2003.
10. Горовой А.М., Сафронов Д.А. Цифровой термогальванический носитель информации // Тезисы II-й Байкальской международной конференции “Магнитные материалы”. Иркутск. 2003.
11. Горовой А.М., Шмидт М.В. Аналоговый термогальванический носитель информации // Тезисы II-й Международной Байкальской научной конференции “Магнитные материалы”. Иркутск, 2003.
12. Горовой А.М., Ушаков А.И., Казаков В.Г. и др. Исследование приближения к равновесному состоянию в пленках сплавов Fe-Ni // Физика металлов и металловедение. 1984. Т. 58. № 1.

CONTROL OF THE DYNAMIC RANGE OF OPERATION LAYER ON THE BASE OF THE Fe-Ni FILMS IN THE ON-BOARD EMERGENCY INFORMATION STORAGE DEVICES

© 2004 A.M. Gorovoi¹, A.N. Malov², D.A. Safronov¹, M.V. Shmidt¹

¹ Irkutsk Air Force Military Institute

² Irkutsk State Technical University

The on-board emergency information storage operating media on the base of polymorphous Fe-Ni alloys thin films is analyzed. Their media can be in the two different crystallographic meta-stable states with the body-centered and face-centered cubic lattices. These states are stable in the wide temperature range. The magnetic and thermo galvanic storage devices with the polymorphous Fe-Ni alloys thin films are operated on the principle of magnetization and thermoelectric properties dependence from its phase composition. Physical and technology dynamic range control parameters such as chemical composition, film thickness and concentration homogeneity are considered.