

2. Sternberg A. Transparent ferroelectric ceramics: properties and applications // *Ferroelectrics*.—1989.—91.—P. 53.
3. Dimza V. I., Sprogis A. A., Kapenicks A. E. et al. Structure, dielectric and optical properties of (Mn, Fe, Co, Eu) doped PLZT ceramics // *Ferroelectrics*.—1989.—90.—P. 45.
4. Sternberg A., Shebanov L., Rubulis A. et al. Radiation-induced effects in transparent ferroelectric ceramics // *Ibid.*—P. 95.
5. Sternberg A., Dimza V., Sprogis A. et al. Optical and dielectric properties of transparent PLZT ceramics with various defects // *Ferroelectrics*.—1988.—80.—P. 301.
6. Гринвалдс Г. Ж., Димза В. И., Диндун С. С. и др. Влияние легирования и радиационной обработки на физические свойства прозрачной сегнетокерамики ЦТСЛ // *Автометрия*.—1988.—N 4.
7. Sternberg A., Rubulis A., Shebanov L. et al. Radiation induced effects in transparent ferroelectric ceramics // *Ferroelectrics*.—1989.—90.—P. 89.
8. Weber H. W., Böck H., Unfried E. and Greenwood L. R. Neutron dosimetry and damage calculations for the triga MARK II reactor in Vienna // *J. of Nuclear materials*.—1986.—137.—P. 236.
9. Лайнс М. Е., Гласс А. М. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы.—М.: Мир, 1981.
10. Штернберг А. Р., Фрицберг В. Я., Борман К. Я. и др. Комплексное исследование особенностей структуры и фазовых переходов в ЦТСЛ состава X/65/35 // *Электрооптическая керамика*.—Рига: Латв. гос. ун-т, 1977.

Поступила в редакцию 19 декабря 1990 г.

УДК 621.397.36

А. В. Антонов, А. Н. Антонец, М. Ю. Гусев, В. Н. Глушенко,
В. В. Лысак, С. Н. Савченко, Н. С. Неустроев

(Киев)

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ЗАПИСЬ СИГНАЛОВ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНКАХ Bi-ЗАМЕЩЕННЫХ ГРАНАТОВ

Введение. Изучению возможности создания эффективных устройств записи информации на основе магнитооптических материалов посвящено большое количество теоретических и экспериментальных работ [1—4]. Интерес к этим исследованиям обусловлен потенциально высокими характеристиками регистрации сигналов, обеспечиваемыми такими средами. При этом одними из наиболее перспективных являются устройства термомагнитной записи (ТМЗ) с электронно-лучевой адресацией [5, 6], позволяющие формировать массивы данных с высокой плотностью и максимальной скоростью регистрации. В настоящее время применительно к устройствам ТМЗ разработан ряд основных структур носителей информации, среди которых наиболее близки к конкретному применению магнитооптические пленки Bi-замещенных ферритов-гранатов. Для приборов такого класса при заданных магнитооптических параметрах пленок эффективность регистрации, функциональные возможности — способность записи сигналов на бинарной среде как в цифровом коде, так и в аналоговом виде — определяются пространственно-временными и энергетическими характеристиками записи, которые, в свою очередь, зависят от условий формирования магнитограмм. Поэтому основная задача работы заключалась в экспериментальном анализе разрешающей способности, скорости и требуемой энергии термомагнитной регистрации в зависимости от амплитуды внешнего магнитного поля, температуры внешнего подогрева носителя, толщины эпитаксиальной пленки, теплофизических и геометрических характеристик отражающего (проводящего) покрытия вре-

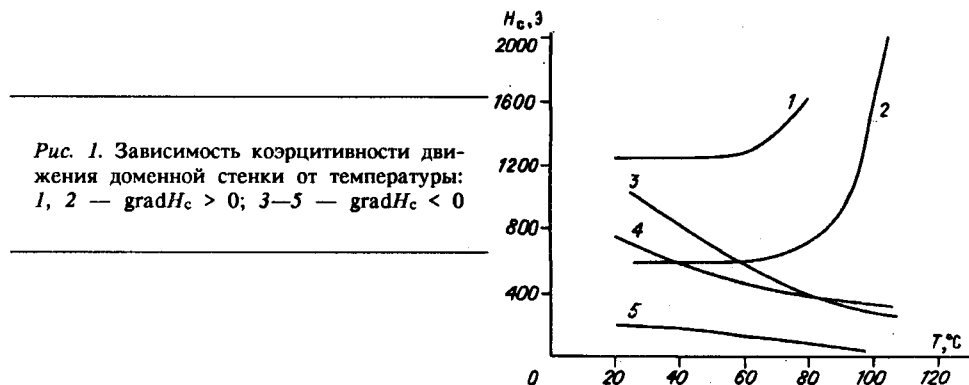


Рис. 1. Зависимость коэрцитивности движения доменной стенки от температуры: 1, 2 — $\text{grad}H_c > 0$; 3—5 — $\text{grad}H_c < 0$

мени нагрева, энергии и пространственного распределения плотности тока электронного луча.

Характеристики исследуемых структур. Работы проводились на однослойных структурах, представляющих собой пленки составов $(\text{BiLuSm})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$ и $(\text{BiGd})_3(\text{FeGaAl})_5\text{O}_{12}$, полученные из раствор-расплава на основе $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{—PbO—V}_2\text{O}_5$. Вектор оси легкого намагничивания ориентирован перпендикулярно плоскости структуры. При этом получены среды двух типов:

- с отрицательным градиентом температурной зависимости коэрцитивности H_c движения доменной стенки ($\text{grad}H_c < 0$);
- с положительным градиентом температурной зависимости H_c ($\text{grad}H_c > 0$).

Графики наиболее характерных зависимостей H_c от температуры T для отдельных пленок представлены на рис. 1. С целью исследования особенностей термомагнитной записи и определения оптимальных параметров регистрации получены пленки с различной толщиной h — от 1 до 7,5 мкм, минимальные и максимальные значения температур Кюри T_c составляли для различных образцов соответственно 60 и 120 °С, величина H_c в диапазоне температур 20 °С — T_c изменялась в пределах 230—2000 Э для высококоэрцитивных и 210—12 Э для низкокоэрцитивных пленок. Удельное фарадеевское вращение φ_F на длине волны считывающего света $\lambda = 0,63$ мкм при $T = 30$ °С не хуже $1 \cdot 10^4$ град/см при оптическом контрасте $K_\varphi \geq 700$.

Экспериментальная установка. Исследования выполнены на экспериментальной установке, структурная схема которой представлена на рис. 2. Конструкция элементов электронно-оптической системы устройства термомагнитной записи позволяет обеспечивать во время регистрации сигналов максимальный ток луча $I_{\text{max}} = 85$ мкА при диаметре луча по уровню 0,5 максимальной плотности пучка $d_{0,5} = 13$ мкм. Минимальный размер сфокусированного на поверхности мишени луча составляет $d_{0,5} = 7$ мкм, при этом предельное значение тока электронного пучка не превышает 45 мкА. Конструкция катодно-модуляторного узла рассчитана для двух значений ускоряющего напряжения: $E_1 = 15$ и $E_2 = 28$ кВ.

Магнитооптическая мишень в установке термостатируется во время работы в диапазоне температур 40 ± 180 °С. Точность термостатирования $\delta T \leq 0,3$ °С. Устройство обеспечения требуемого теплового режима вместе с мишенью находится в равномерном (по площади мишени) магнитном поле катушек намагничивания и стирания. Относительная неравномерность поля намагничивания H_z в апертуре 10×10 мм магнитооптической пленки $(\delta H_z / H_z) 100 \% \leq 0,8$ %. Максимальные значения полей стирания H_s и намагничивания составляют соответственно $H_{s\text{max}} = 2200$, $H_{z\text{max}} = 800$ Э.

Система электронного обеспечения позволяет модулировать интенсивность регистрирующего электронного луча входным сигналом в полосе частот 0—20 МГц. В режиме записи импульсных сигналов

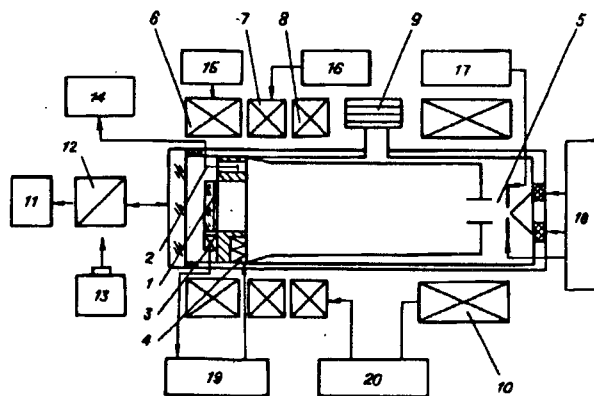
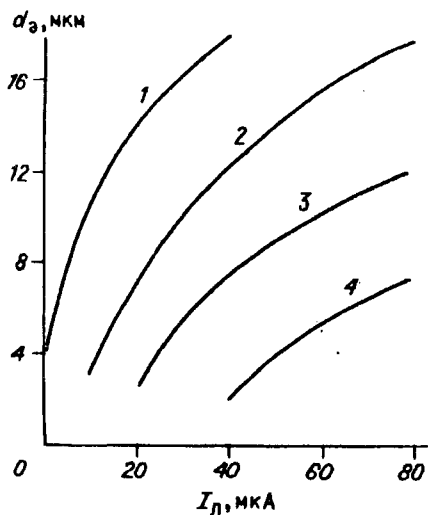


Рис. 2. Экспериментальная установка:

1 — мишень; 2 — зонд; 3 — датчик температуры; 4 — нагреватель; 5 — катодно-модуляторный узел; 6 — система намагничивания и стирания; 7 — отклоняющая система; 8 — фокусирующая система; 9 — ионно-геттерный насос; 10 — корректирующая система; 11 — микроскоп; 12 — поляризационный кубик; 13 — осветитель; 14 — осциллограф; 15 — блок управления магнитным полем; 16 — генератор разверток; 17 — генератор сигнала; 18 — блок питания катодно-модуляторного узла; 19 — блок нагрева и термостабилизации; 20 — блок фокусировки и коррекции пучка

требуемое время воздействия луча на мишень устанавливается в пределах 30 мкс — 10 нс. Формирование магнитограмм выполняется в режимах регистрации одиночных линий и точек, набора штрихов или точек в виде регулярного раstra.

Результаты исследований. Основная причина ограничения скорости термомагнитной записи заключается в низкой чувствительности пленок. Как показали результаты исследований, последняя в значительной мере определяется исходной температурой среды T_0 , толщиной магнитооптического слоя и величиной внешнего магнитного поля записи. На рис. 3 показана зависимость размера элемента регистрации d_3 от интенсивности электронного луча I и значения $\Delta T = T_c - T_0$ для пленки с $h = 1,8$ мкм, $T_c = 110$ °С и $\text{grad}H_c < 0$ (см. рис. 1, кривая 3). Результаты получены для луча диаметром $d_{0,5} = 1,2$ мкм при ускоряющем напряжении $E = 15$ кВ. Длительность импульса нагрева τ и величина внешнего поля составляли соответственно $\tau = 80$ нс, $H_z = 40$ Э. При этом с целью исключения влияния на результат измерений неравномерности параметров среды по площади и электромагнитных наводок со стороны управляющих сигналов, а также анализа особенностей различных режимов нагрева



запись выполнялась как неподвижным во время регистрации лучом, так и в режиме сканирования немодулированного, в пределах одной строки, луча. Характерный вид формируемых магнитограмм представлен на рис. 4. Как следует из полученных зависимостей, чувствительность сред резко возрастает с уменьшением значения ΔT . Например, для $\Delta T = 5; 15; 24; 35$ °С энергия записи составляет 0,015; 0,062; 0,11 и 0,23 Дж/см². К сожалению, повышение чувствительности пленок путем пред-

Рис. 3. Результаты термомагнитной записи (°С):
1 — $\Delta T = 5$; 2 — $\Delta T = 15$; 3 — $\Delta T = 24$;
4 — $\Delta T = 35$

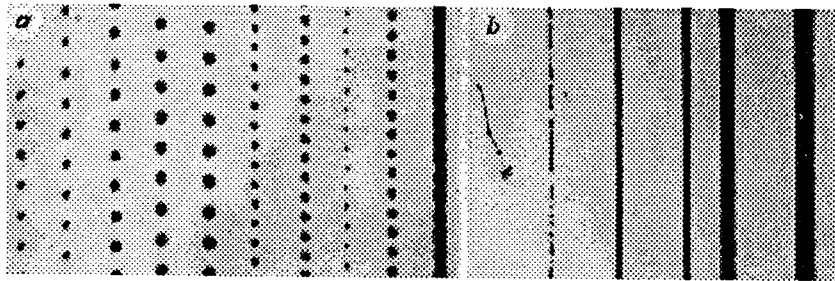


Рис. 4. Результаты термомагнитной записи:
 а — $V_{\phi} = 0$ м/с, $\tau_{и} = 80$ нс; б — $V_{\phi} = 175$ м/с, $\tau_{и} = 270$ нс; V_{ϕ} — скорость движения луча по поверхности пленки; $\tau_{и}$ — длительность импульса нагрева

варительного подогрева приводит к ухудшению разрешающей способности записи. Так, например, для сред с $h = 2,1$ мкм минимальный размер элемента регистрации увеличивается от $d_{\min} = 2,2$ до $d_{\min} = 5,3$ мкм при изменении ΔT от 35 до 5 °С. Кроме того, при уменьшении значения ΔT резко падает эффективность пленок вследствие уменьшения величины фарадеевского вращения.

Исследования зависимости параметров записи от величины внешнего магнитного поля выполнялись в режиме незначительного подогрева мишени ($\Delta T = 35$ °С) при полях $H_z = 24; 75; 120$ и 200 Э и импульсом воздействия $\tau_{и} = 160$ нс. Полученные результаты (рис. 5) позволяют сделать вывод о резком повышении чувствительности пленок. Однако реализация такого режима регистрации связана со значительными трудностями, обусловленными взаимодействием электронного луча с внешним магнитным полем. По этой причине в устройствах термомагнитной записи с электронно-лучевой адресацией и традиционной схемой электронно-оптической системы реально реализуется только метод записи в точке Кюри или регистрация в результате резкого снижения коэрцитивности в области $T < T_c$. Экспериментальная оценка возможности реализации устройств с $H_z = 300$ Э показала, что даже при введении динамической фокусировки и коррекции формы раstra регистрация сигналов с коэффициентом нелинейных искажений $K \leq 3\%$ достигается в апертуре мишени $S = 6 \times 6$ мм.

Для анализа влияния на результат формирования магнитограмм пространственно-энергетических характеристик пучка в пленках с различным градиентом H_c (см. рис. 1, кривые 2, 4) и $h = 1,9$ мкм проводилась регистрация лучом, диаметр которого изменялся в пределах 6–15 мкм для двух значений ускоряющего напряжения $E_1 = 15$ и $E_2 = 28$ кВ (рис. 6). Во всех случаях $\Delta T = 15$ °С, $\tau_{и} = 80$ нс, $H_z = 24$ Э. Как и следовало ожидать, с уменьшением значения $d_{0,5}$ достигается более высокая разрешающая способность записи. Однако, несмотря на повышение при этом плотности энергии луча, максимальный размер образованного домена изменяется незначительно с увеличением тока пучка. Например, сравнение кривых 3–6 на рис. 6 показывает, что увеличение плотности

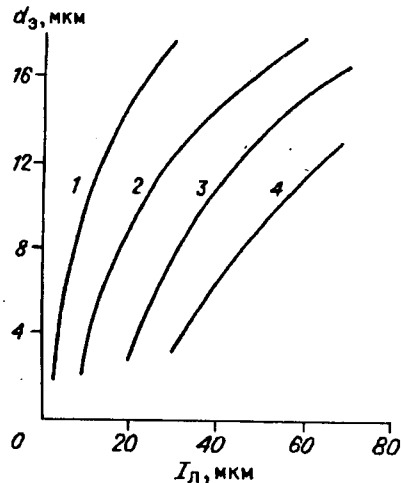


Рис. 5. Результаты термомагнитной записи:
 $h = 1,5$ мкм; 1 — $H_z = 200$; 2 — 120; 3 — 75;
 4 — 24 Э

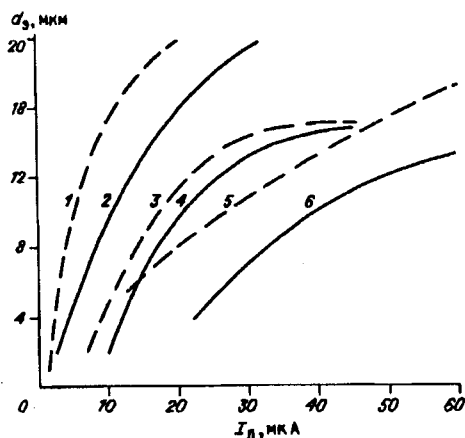


Рис. 6. Результаты термомагнитной записи:
 1, 2 — $E = 28$ кВ, $d_{0,5} = 15$ мкм; 3, 4 — $E = 15$ кВ, $d_{0,5} = 7$ мкм; 5, 6 — $E = 15$ кВ, $d_{0,5} = 15$ мкм; $\text{grad}H_c > 0$ (сплошные линии); $\text{grad}H_c < 0$ (штриховые)

тока луча j в 4 раза приводит к изменению d_3 в среднем в 1,5 раза. Это объясняется прежде всего тем, что площадь переключенной доменной структуры определяется объемом нагретой выше T_c зоны, т. е. $d_3 = K \sqrt[3]{j}$, где K — коэффициент пропорциональности, определяемый граничными условиями нагрева. Кроме

того, уменьшение размера луча, по-видимому, приводит к вытягиванию изотермы $T = T_c$ по оси, перпендикулярной плоскости мишени, что приводит к снижению общей площади образуемого домена.

Повышение ускоряющего напряжения сопровождается как снижением требуемого тока луча для заданных размеров элементов записи, так и увеличением разрешающей способности регистрации (рис. 6, кривые 1, 2). Полученные результаты объясняются одновременным увеличением плотности энергии воздействия и глубины проникновения электронов в материал мишени.

В процессе исследований отмечалось возрастание шумов записи в области малых уровней входного сигнала (размеров элементов регистрации), что выражалось в случайном характере переключения доменной структуры по краям зоны нагрева. При этом под шумом площади понимается максимальное значение отклонения площади элемента записи от ее среднего значения при неизменных условиях регистрации. Для пленок с $\text{grad}H_c < 0$ шумовая площадь $S_{ш}$ в среднем составляет 7; 1,2 и 0,5 % от основной при размерах элементов регистрации соответственно 4; 10 и 15 мкм. В этом отношении выгодно отличаются пленки с положительным $\text{grad}H_c$. Здесь $S_{ш}$, как правило, меньше в 2—3 раза.

В работе достаточно большое внимание уделялось вопросу влияния на параметры записи характеристик отражающего покрытия: толщины, состава и теплофизических констант. К отражающим покрытиям предъявляется ряд требований, которые при определенных условиях могут быть противоречивыми. С одной стороны, для обеспечения максимальной эффективности считывания покрытие должно выполняться из материала с высоким коэффициентом отражения и иметь толщину не менее 55—80 нм. С другой стороны, для обеспечения максимальной эффективности записи оно не должно приводить к значительному снижению энергии нагрева феррит-гранатовой пленки, т. е. отражающий слой должен иметь низкие коэффициенты вторичной эмиссии, теплопроводность и малую толщину. В соответствии с приведенными рассуждениями осуществлена сравнительная экспериментальная оценка характеристик записи в пленках, покрытие которых выполнено напылением Al, Cr, Cu, Ti и Ag. При этом толщина l изменялась от 7 нм до 1,1 мкм. Как показали результаты исследований, характеристики записи практически не зависят от материала отражающего слоя при $l \leq 30$ нм, что объясняется достаточно большой глубиной проникновения h_3 электронов в мишень. С учетом состава покрытия и феррит-гранатовой пленки $h_3 \approx 0,48 - 0,6$ мкм. Кроме того, при $E \leq 30$ кВ коэффициент вторичной эмиссии слабо зависит от атомного номера материала покрытия [7].

Одна из особенностей термомагнитной регистрации заключается в ограничении разрешающей способности и скорости записи не только со

стороны пространственно-энергетических параметров электронного луча, но и со стороны толщины феррит-гранатовой пленки. Поскольку переключение доменной структуры для заданного внешнего магнитного поля требует нагрева среды до глубины переключения L_s , с увеличением h резко падает чувствительность мишеней. Максимальное значение L_s , соответствующее $H_z = 20$ Э, составляет в исследованных пленках $L_s = (0,55 - 0,65)h$. Сравнительный анализ параметров записи в пленках с различной толщиной показал, что для обеспечения стандартного телевизионного режима формирования изображений максимальное значение h для однослойных коэрцитивных сред и реально возможных в электронно-лучевых приборах параметрах записывающего луча не должно превышать 4 мкм.

Обсуждение результатов. В соответствии с полученными результатами можно сделать выводы относительно параметров систем электронно-лучевой термомагнитной регистрации сигналов в однослойных коэрцитивных пленках Vi-замещенных ферритов-гранатов при условии, что $E_z = 15$ кВ, $d_{0,5} = 7$ мкм, а плотность тока катода не превышает 3 А/см²:

1. Максимальные скорость и плотность формирования магнитограмм при записи информации в бинарном виде составляют соответственно $3,4 \cdot 10^7$ бит/с и $14 \cdot 10^6$ бит/см².

2. При регистрации аналоговых сигналов (например, полутоновых изображений) предпочтение следует отдать методу амплитудной модуляции, обеспечивающему максимальные скорость и динамический диапазон записи.

3. Предельный динамический диапазон определяется максимальными размерами элемента регистрации и шумовыми характеристиками структуры. Например, при формировании массива данных из 700×1000 элементов в полосе 6,5 МГц значение динамического диапазона в зоне записи достигает 42 дБ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Imamura N. Research applies magnetic thin films and the magneto-optical effect in storage devices // IEE.—1983.—N 195.—P. 100.
2. Рыбак В. И., Червоненкис А. Я. Магнитооптические устройства в оптоэлектронике // Зарубеж. электрон. техника.—1980.—Вып. 4.
3. Балбашов А. М., Лисовский Ф. В., Раев В. К. и др. Элементы и устройства на цилиндрических магнитных доменах: Справочник / Под ред. Н. Н. Евтихиева, Б. Н. Наумова.—М.: Радио и связь, 1987.
4. Лысак В. В. Пространственно-энергетические и временные характеристики электронно-лучевой термомагнитной записи // ЖТФ.—1986.—56, вып. 8.
5. Дереновский М. В., Лысак В. В., Шмарев Е. К. Магнитооптический пространственно-временной модулятор света // Автометрия.—1985.—N 2.
6. Глушенко В. Н., Дереновский М. В., Лысак В. В. Исследование методов электронно-лучевой термомагнитной записи // Автометрия.—1986.—N 2.
7. Яковец Х., Гоулдстейн Д. Практическая растровая электронная микроскопия.—М.: Мир, 1978.

Поступила в редакцию 9 января 1991 г.