

Э. И. РАУ, Д. О. САВИН, Г. В. СПИВАК
(Москва)

РЕВЕРСИВНАЯ УСКОРЕННАЯ МИКРОЗАПИСЬ НА СВЕРХОПТИЧЕСКОМ УРОВНЕ И ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ РАСТРОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА

Введение. Сравнительные характеристики методов микрозаписи электронным лучом. Создание высокоэффективных автоматических систем обработки изображений и хранение больших массивов информации — важные задачи современной науки и техники. Ощущается необходимость в обширной, хорошо организованной, обладающей большой емкостью памяти для хранения различного рода данных. В связи с этим в последнее время ведется интенсивный поиск новых методов и средств записи, считывания и стирания информации световыми и электронными пучками.

При оптической записи регистрирующими средами служат в основном галодосеребряные фотоматериалы, халькогенидные стеклообразные полупроводники, а для реверсивной оптической записи применяются красители, ионные кристаллы, фототермопластические, термомагнитные, фотохромные и фотопреломляющие материалы [1, 2]. Объем архивной памяти на одной голографической пластине реально составляет 10^7 — 10^8 бит, чувствительность некоторых материалов — 10^{-6} Дж/см², массив в 10^4 точек преобразуется за 10^{-6} с [3, 4]. Регистрация многократно увеличивающейся информации и ее хранение — новая область применения лазерных пучков. Общая кратность уменьшения с негативной микрофиши на голограмме составляет 200—300, а разрешение — до 3000 лин·мм⁻¹, что нельзя считать пределом возможного.

Альтернативной является запись и воспроизведение информации сканирующим электронным зондом [5, 6]. В частности, все фотохромные материалы, обладающие «оптической» памятью, пригодны для записи электронным лучом. Механизм записи основан на эффектах локальной активации или гашения катодолюминесценции и сопутствующей долговременной памяти этих явлений на материалах: KJ(Tl) [5]; NaCl и LiF [7]; KCl [8]; MgO [9]; спиropиране и двухромовых красителях [10]; GaN(Zn) [11]; антрацене и CdS [12], а также целом ряде катодолюминесцентных материалов. Стирание записи на указанных средах осуществляется ультрафиолетовым облучением или нагревом. Основные недостатки записи на основе эффекта долговременной катодолюминесцентной памяти — невысокое быстродействие (вследствие релаксации послесвечения), большая энергоемкость и малая чувствительность, а также неоднородность свечения, связанная с микродефектностью структуры. Принципиальным ограничением пространственного разрешения при записи в катодолюминесцентном режиме (впрочем, как и при записи электронным зондом на МДП-слоях и считывании в режиме наведенного тока [12]) является то обстоятельство, что размеры области возбуждения и излучения значительно превышают диаметр облучающего пучка электронов. Отклик в «массивной» катодолюминесцентной мишени формируется в объеме 1 мкм³ и более, что определяется областью взаимодействия электронов первичного высокоэнергетического пучка с твердым телом.

Более эффективными следует признать электронно-лучевые методы получения явных или скрытых изображений, основанные на локальной зарядке мишени, проплавлении, контаминации и других эффектах, связанных с химическими или физическими изменениями состава, структуры или свойств тонких облучаемых пленок.

Взаимодействие электронного пучка с веществом различных пленок уже сейчас широко используется в микроэлектронике для создания фото-

и электронолитографических масок с субмикронными штрихами [13], а также в технике записи, накопления и считывания информации [5, 6]. Электронно-зондовые методы миниатюризации, копирования и воспроизведения документальной информации могут вполне конкурировать с голографическими, превосходя их, однако, по некоторым существенным параметрам, например по плотности записи и кратности уменьшения микрофиши. Но электронографические устройства для целей обработки массивов информации малоприспособны, так как штриховые линии здесь создаются экспонированием фото- или электронорезистов, фиксацией последних и дальнейшей обработкой. Помимо очевидной неоперативности, следует отметить невозможность обработки полутонковой, т. е. аналоговой, информации, а также отсутствие реверсивности.

Наибольший интерес представляют эксперименты по созданию устройств для микрозаписи, преобразования и кодирования изображений на базе просвечивающего [14—16] и растрового [17] электронных микроскопов. Эксперименты показали высокую эффективность микрозаписи электронным лучом, основанной на явлении контаминации полимерных слоев на свободно несущих тонких пленках, а также возможность масштабного преобразования микрофильмов с высокой степенью миниатюризации, недоступной фототелевизионным, голографическим и другим методам.

Приспособление просвечивающего электронного микроскопа для целей микрозаписи и считывания [14, 16] привело к тому, что значительно возрос объем оборудования как из-за увеличения количества и усложнения функциональных блоков, так и за счет дополнительных устройств управления, обеспечивающих сканирование электронного пучка, фотосчитывания (применение шаговых моторчиков или осциллографических трубок), синхронизации, сопряжения и квантования видеосигнала. Все это послужило причиной того, что для решения отдельной конкретной задачи — обработки информации — стала использоваться неоправданно избыточная по своим функциональным возможностям негибкая аппаратура. Более гибкая, универсальная и оперативная система преобразования и обработки информации на основе растрового электронного микроскопа (РЭМ) и ряд способов микрозаписи дискретных и аналоговых изображений предложены в [17].

В настоящей работе эта система существенно модифицирована с целью ускорения записи и реализации возможности локального стирания информации. Рассмотрены физические аспекты процесса записи методами контаминации и проплавления органических тонких пленок, а также вопросы разрешения и контраста изображений. Приводятся параметры системы и демонстрации возможных практических применений методики.

Техника записи, воспроизведения и стирания информации сканирующим электронным зондом. Механизм записи электронным пучком РЭМ на тонкие пленки — накопители записи следующий. Молекулы углеводородов остаточных паров масел, всегда имеющиеся в условиях технического вакуума колонны РЭМ, селективно конденсируются в точках взаимодействия электронного пучка с поверхностью пленки. В принципе поверхность всегда покрыта тонкими монослоями, конденсированными из газообразной среды, но полимеризация адсорбированных молекул происходит только при бомбардировке мишени-носителя электронным пучком. Таким образом, в зоне взаимодействия сфокусированного пучка РЭМ с пленкой образуется полимерный слой, толщина которого возрастает со временем (дозой) облучения, в частности, при замедлении скорости сканирования пучка.

Если же паровая среда (молекулярное рабочее вещество) состоит из соединений, расщепляющихся под действием пучка электронов на летучие компоненты и нелетучий осадок, то в образовании контаминационного слоя участвует нелетучая компонента. Процессом конденсации, т. е. приращения толщины слоя в единицу времени, можно управлять не только

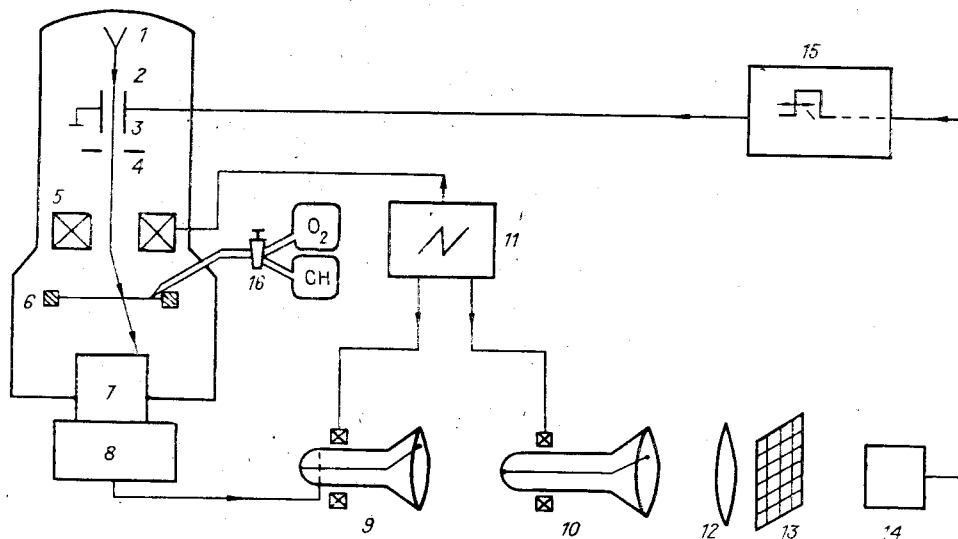


Рис. 1. Схема РЭМ для записи и воспроизведения информации:

1 — электронная пушка; 2 — электронный пучок; 3 — пластины стробирующей системы; 4 — отсекающая диафрагма; 5 — сканирующие катушки; 6 — пленка-носитель; 7 — световод с люминесцентным торцевым покрытием; 8 — ФЭУ; 9, 10 — кинескопы экранов РЭМ; 11 — генератор развертки; 12 — оптическая фокусирующая система; 13 — фотопленка-оригинал (источник изображения); 14 — ФЭУ; 15 — широко-импульсный модулятор; 16 — натекаль и резервуары с газовой средой

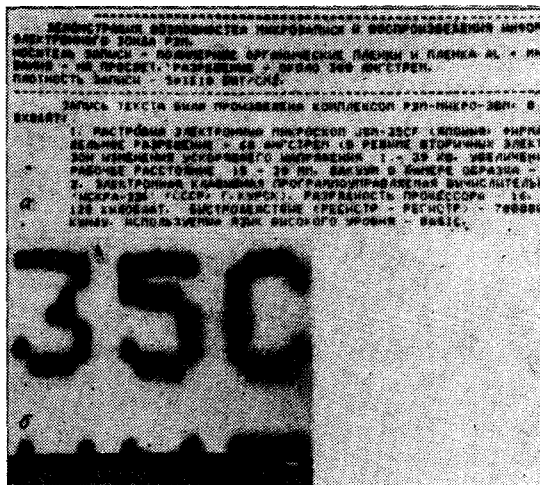
путем изменения интенсивности электронного пучка или температуры мишени, но и изменением парциального давления газообразной среды в окрестности облучаемого участка.

Для предотвращения конденсации молекул газообразной среды (паров масла, рабочего вещества из летучих органических соединений) на всей поверхности пленки-носителя ее температуру желательно поддерживать выше критической температуры конденсации рабочего вещества. В качестве носителя записи использовались металлические (Al, Au) и органические (формвар, парлодий) пленки толщиной в десятые и сотые доли микрона. Металлические пленки-носители более прочны и помехозащищены, но обладают большей степенью неоднородности по структуре. Полимерные органические пленки выгодно отличаются низкой микродефектностью (менее 0,1 на 1 см²), т. е. являются практически однородными и бесструктурными даже на микроуровне.

Рассмотрим структурную схему устройства записи-воспроизведения на основе РЭМ (рис. 1). Генератор развертки РЭМ 11 управляет синхронным движением электронного зонда 2 по образцу — органической пленке 6 — и луча на экране фотосъемочной ЭЛТ 10. Оптическая система РЭМ 12 фокусирует «бегущее» световое пятно в плоскости негатива 13 с исходным изображением. Прошедший через фотонегатив свет, промодулированный по интенсивности локальной прозрачностью негативного изображения на фотопленке, регистрируется ФЭУ 14. Сигнал с него поступает на широко-импульсный модулятор 15, который преобразует амплитудно-модулированный сигнал в кодированный по времени отпирающий зонда в каждой сканируемой точке на пленке-носителе 6. Чем больше плотность негатива 13, т. е. меньше сигнал с ФЭУ 14, тем более длительный отпирающий импульс вырабатывает модулятор 15, управляющий строб-системой 3, 4, и на пленке 6 записывается более длинный штрих. При этом частота опроса ФЭУ определяется задающим генератором, входящим в состав широко-импульсного модулятора. Для ускорения процесса записи в окрестность образца — пленки 6 — через игольчатый натекаль 16 осуществляется напуск органических летучих СН-соединений (например, этилена, акрилата) из специального резервуара. Эксперименты показали, что при указанном приеме время записи массива информации сокращается в 10—15 раз по сравнению с записью без дополнитель-

Рис. 2. Демонстрация программированной записи:

а — пример записи текста при управлении от микроЭВМ; б — фрагмент текста с масштабом преобразования $5 \cdot 10^4$ (внизу справа — масштабная метка 0,1 мм)



ного напуска рабочего вещества [17]. Вероятно, такой способ повышения скорости записи является оптимальным, так как другие известные методики (например, использование в вакуумной камере дополнительной молекулярной пушки, создающей поток конденсирующихся на пленке — носителе молекул, или помещение в окрестности пленки подогреваемого и продуваемого аргоном сосуда с маслами [13]) довольно громоздки в техническом решении.

Для селективного стирания записи по этому же нагревателю вводится кислород, который окисляет слой контаминации при бомбардировке электронами, и углеродный слой улетучивается. Без существенного ухудшения качества изображения допускается несколько десятков циклов «запись — стирание».

Считывание записанной электронным зондом информации на пленке б проводится в сканирующем режиме «на просвет» как при медленных, так и при телевизионных развертках с повторяемостью до 10^8 циклов при меньшей на два порядка интенсивности пучка электронов. Промодулированный по интенсивности прошедший пучок электронов регистрируется системой сцинтиллятор 7 — ФЭУ 8, а видеосигнал воспроизводится на дисплейном экране РЭМ 9. Для предотвращения фоновой контаминации в камеру РЭМ помещается азотная ловушка.

Достигнутые этим методом типичные параметры процессов записи — хранения — воспроизведения следующие: время хранения следов записи 3—5 лет, пространственное разрешение до 25 нм, скорость записи до 10^4 бит/с, считывания 10^8 бит/с, доза облучения при записи около $5 \cdot 10^{-4}$ Кл/см², энергоемкость 3 Дж/см² для массива 10^{10} бит/см². Такая плотность записи является, по-видимому, наибольшей для всех существующих систем аналоговой и цифровой записи и позволяет, например, переписать все 30 томов Большой Советской Энциклопедии на пленке размером 2 см² (при записи без кодирования — рис. 2, а, б). Если кодировать каждый символ, например, 8 битами (код КОИ-8), то требуемая площадь может уменьшиться до 0,3—0,5 см². При дальнейшем увеличении быстродействия записи возможно осуществление звукозаписи на эти же полимерные пленки, для чего потребуется увеличить быстродействие на два порядка (возможно, при использовании другого, легколетучего и конденсирующегося рабочего вещества).

Остановимся подробнее на отдельных технических решениях системы. При поточечных (дискретных) вариантах записи, осуществляемых управлением движения электронного зонда РЭМ с помощью микроЭВМ (включается вместо модулятора 15) по заданной программе, следы записи образуются из ряда точек, наносимых последовательно во времени. Программированная запись (при движении электронного зонда от одного элемента к другому непрерывно или скачками) не нуждается в оригинале для считывания, обладает высокой гибкостью при изменениях программы (см. рис. 2). Цифровые развертки позволяют также непосредственно вводить считываемое изображение в ЭВМ для его коррекции, обработки или хранения. Это можно осуществлять либо при оцифровке

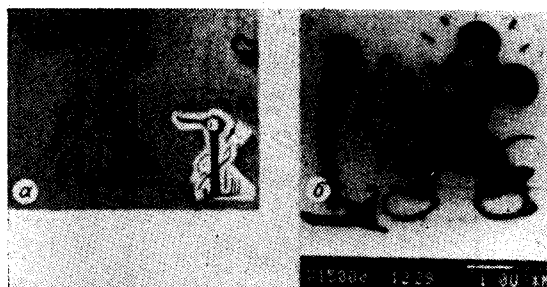


Рис. 3. Штриховый программированный рисунок, полученный контаминацией (слева) и проплавлением (справа) (а); полутоновое изображение, конвертированное с негатива при кодировании с помощью широтно-импульсного модулятора (б)

считываемого сигнала с ФЭУ, либо прямым соединением РЭМ с помощью волоконного упорядоченного световода с «оптической» ЭВМ.

При считывании информации с негативов-микрофильмов для их конвертирования и масштабного преобразования посредством записи на полимерные пленки электронный зонд с помощью управляемой по скорости системы разверток [17] или автономной системы разверток пробегает строчка за строчкой весь кадр, но отпирается на каждом элементе для записи лишь на время, пропорциональное локальному потемнению оригинала-микрофильма. Тем самым обеспечивается адекватность полутонового изображения контрасту записанного на пленке, многократно уменьшенного изображения (рис. 3, б).

Таким образом, как система [17], так и усовершенствованная здесь осуществляют преобразование амплитудно-модулированного сигнала ФЭУ в модулированный по времени записи, однако в [17] изображение состоит из точек разной толщины контаминационного конденсированного слоя, а в описываемом случае — из штрихов различной длины.

Расчет контраста изображения следа записи. Пусть на пленку падает поток электронов n_0 , координата X отсчитывается в глубину образца от его поверхности, тогда количество прошедших до глубины X электронов определяется выражением [18]

$$n(X) = n_0 \exp(-\mu X), \quad (1)$$

где μ — коэффициент поглощения вещества. Выражение для контраста от перепада высот h на пленке толщиной H запишется в следующем виде:

$$C = \frac{n(H+h) - n(H)}{n(H+h) + n(H)} = \text{th} \frac{\mu |h|}{2}, \quad (2)$$

причем формула (2) справедлива как для выступов, так и для впадин на тонкой пленке. Если считать, что минимальное регистрируемое изменение интенсивности равно 5%, то минимальное видимое изменение толщины будет $h_{кр} = 0,1/\mu$. Для органических пленок, например, $\mu \approx 14 \text{ мкм}^{-1}$ при ускоряющих напряжениях $U_0 = 20 \text{ кВ}$ (рассчитано по данным [18]), поэтому $h_{кр} \approx 7 \text{ нм}$.

Цель нашего рассмотрения — определение зависимости контраста записи, т. е. в соответствии с (2) изменения в толщине пленки, от параметров записи. Экспериментально получены два типа контраста при различных условиях записи: темный и светлый (рис. 3, а). Следовательно, в первом случае формировался след в виде выступа, а во втором — в виде канавки. В первом варианте записи след образуется вследствие полимеризации электронным зондом свободных молекул углеводородов, находящихся на поверхности пленки. Учет всех механизмов перемещения свободных молекул по поверхности приводит к уравнению для концентрации свободных молекул на поверхности пленки в стационарном случае при круговой симметрии облучения [15]:

$$v - \frac{n(r)}{\tau} + D \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left[r \frac{dn(r)}{dr} \right] - \frac{j_0 \sigma}{e_0} f(r) n(r) = 0, \quad (3)$$

где D — коэффициент диффузии; σ — сечение полимеризации; τ — время

жизни свободных молекул на поверхности пленки; j_0 — плотность тока в центре пучка; e_0 — заряд электрона; $n(r)$ — концентрация свободных молекул углеводородов; безразмерная функция $f(r)$ характеризует форму пучка электронов; v — поток свободных молекул на поверхность пленки.

Уравнение (3) решалось рядом авторов для различного вида функций $f(r)$. Так, в [19] рассматривалось равномерное облучение, т. е. $f(r) = 1$, $0 \leq r < \infty$, и поэтому не учитывалась поверхностная диффузия. В работах [15, 20] функция $f(r)$ имела вид $f(r) = 1$ при $r \leq r_0$ и $f(r) = 0$ при $r > r_0$. Однако в [20] неверно поставлено граничное условие $n(r_0) = 0$, что неправомерно (не учтена диффузия). Кроме того, в [20] не совсем точно выписана асимптотика коэффициента α , а основная расчетная формула (13) неверна (см. формулу (8) в этом разделе).

В перечисленных работах для получения аналитических решений авторы берут $f(r)$ в указанном выше виде, но в реальном электронном пучке вид $f(r) = 1$ не реализуется. Сделаем замену переменных

$$x = r/r_0, \quad y(x) = n(x)/n(\infty) \quad (5)$$

и введем новые коэффициенты

$$\lambda = \sqrt{D\tau}, \quad K = \lambda/r_0, \quad \tau_j = e_0/j_0\sigma, \quad M = \alpha/\tau_j, \quad (6)$$

где λ — диффузионная длина пробега свободных молекул на поверхности; τ_j — среднее время полимеризации свободных молекул при равномерном облучении электронами с плотностью j_0 . Тогда уравнение (3) с граничными условиями примет вид

$$\begin{cases} K^2 \frac{1}{x} \frac{d}{dx} \left[x \frac{dy(x)}{dx} \right] - y(x)(1 + M \exp(-x^2)) + 1 = 0, \\ y(0) < \infty, \quad y(\infty) = 1. \end{cases} \quad (7)$$

Система (7) решалась методом прогонки [24] при различных значениях параметров K и M . Далее по рассчитанным значениям $y(x, K, M)$ определялись скорость роста толщины пленки $v(x, K, M)$ и ее отношение к скорости роста при равномерном облучении $v(K=0, M)$. Так как в последнем случае согласно [19] $v = n(K=0, M) \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_j} \right)$, то

$$v(K=0, M) = n(K=0, M) \frac{V}{\tau_j} = \frac{VvM}{1+M}, \quad (8)$$

где V — объем одной молекулы (в [20] в выражении (13) неверно принято, что $v(K=0, M) = \omega_\infty = Vv$).

Скорость роста толщины пленки для конечного радиуса зонда

$$v(x, K, M) = n(x, K, M) \frac{f(x)V}{\tau_j} = VvMu(x, K, M)f(x). \quad (9)$$

Поэтому скорость полимеризации $v(x, K, M)$ в стационарном случае прямо пропорциональна потоку, т. е. давлению паров масел или другого рабочего вещества, и плотности тока зонда. Таким образом, запишем искомое соотношение

$$H(x, K, M) \equiv \frac{v(x, K, M)}{v(K=0, M)} = y(x, K, M)f(x)(1+M). \quad (10)$$

Графики функции $H(x, K, M)$ при различных значениях параметров K и M приведены на рис. 4.

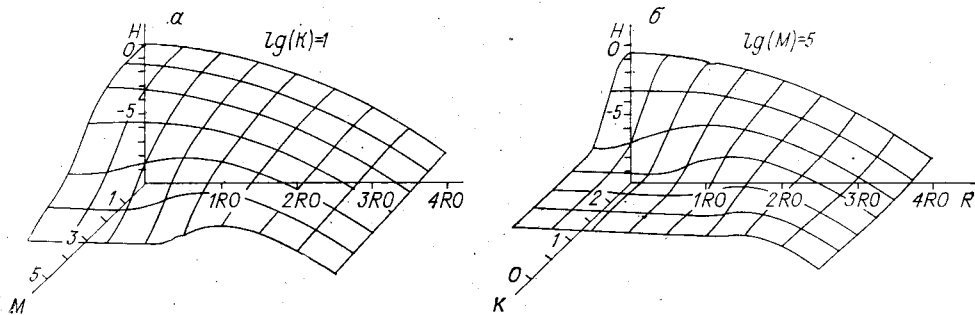


Рис. 4. Графики функции $H(x, K, M)$ при $\lg K = 1$ (а) и при $\lg M = 5$ (б).
Шкалы по M, K, H даны в логарифмическом масштабе

Согласно полученным зависимостям при больших значениях K либо при малых значениях M концентрация свободных молекул $y(x)$ стремится к равномерной, поэтому концентрация полимеризовавшихся частиц повторяет форму пучка $f(x)$. При уменьшении K (увеличении радиуса пучка) и увеличении M (увеличении j_0) концентрация свободных молекул в центре пучка уменьшается и при определенных K и M $y(x)$ спадает к центру пучка быстрее, чем возрастает $f(x)$. В данном случае в центре пучка образуется минимум, а на некотором расстоянии от центра — максимум полимеризовавшихся молекул. При достаточно малых K и больших M уравнение (7) приобретает вид

$$y(x) M \exp(-x^2) = 1, \quad (11)$$

т. е. кривая $y(x)$ обратна $f(x)$ и графики $H(x, K, M)$ имеют широкое ровное плато насыщения вблизи центра луча.

Следовательно, исходя из рис. 4, полимеризовавшееся пятно всегда шире размера электронного зонда, при определенных K и M может иметь минимум в центре и стремится к форме зонда при уменьшении диаметра зонда и плотности тока.

В работе [22] выдвинуто предположение о том, что явление контаминации объясняется накоплением положительного заряда в пленке вследствие выбивания первичным зондом низкоэнергетических вторичных электронов, в качестве подтверждения приводятся снимки пятен с минимумом контраста в центре. В наших экспериментах получены аналогичные результаты, которые полностью согласуются с результатами теоретических расчетов (см. рис. 4).

Кроме того, нами повторены проведенные в [22] эксперименты по определению знака заряда на пленке с применением апертурной диафрагмы для случая светлого контраста. Эксперимент не выявил существенного искривления электронных траекторий вблизи предполагаемых областей зарядки. Значит, контраст обусловлен топографией поверхности, а не траекторными эффектами. В пользу этого свидетельствует тот факт, что записанные изображения не претерпели заметных изменений за время хранения (вне вакуума при комнатной температуре) в течение года, а в случае механизма по [22] заряд должен был бы рассасываться, ухудшая тем самым пространственное разрешение изображений.

Таким образом, хотя явление положительной зарядки на непроводящих пленках имеет место, оно, по-видимому, не является основным, а зависимости, приводимые в [22], можно объяснить с помощью теории [15], расширенной на гауссовы пучки.

Рассмотрим нестационарную задачу контаминации для облучения гауссовым пучком, т. е. переходные процессы. Введем безразмерный параметр $s = t/\tau$, определяющий временное поведение процесса записи. В наших экспериментах время облучения одной точки не превышало 0,05 с, параметр $\tau \approx 1$ с [20], значит, параметр s при записи не превышает величины 0,05. При таких значениях s , как показывают расчеты, решения $y(x, K, M, s)$ отклоняются от начального значения $y(x, K, M, 0) = 1$

не более чем на 20% при любых параметрах K и M в выбранном диапазоне их изменения.

Тогда скорость полимеризации при малых временах записи выразится как

$$v(x, K, M, s) = V\nu\tau \frac{f(x)}{\tau_j} = V\nu M f(x), \quad (12)$$

а толщина полимеризовавшейся пленки

$$h(x, K, M, t) = V\nu M f(x) t \quad (13)$$

линейно зависит от времени t , прямо пропорциональна потоку паров масел на поверхность, плотности тока зонда и определяется формой пучка. Следовательно, в соответствии с (2) для обеспечения требуемого контраста необходимо время

$$t_{кр} = \frac{2C_{кр}}{V\nu\mu M} = \frac{0,1}{V\nu\mu M}. \quad (14)$$

Зависимость (14) проверена экспериментально путем записи строки с линейно изменяющимся от 0 до 0,15 с временем записи отдельных точек. Контраст проявляется уже при длительности 0,02 с, а линейность контраста сохраняется до $t_{эл} = 0,08$ с при используемых интенсивностях пучка, где $t_{эл}$ — время облучения одного элемента. Обратной пропорциональной зависимости $t_{кр}$ от плотности тока (т. е. параметра M) также подтверждается.

Рассмотрим теперь второй способ записи, при котором в пленке проплавляется углубление. Перегрев пленки [23] еще не дает формы проплавленного отверстия, и для определения формы надо решать нелинейное уравнение Стефана — Больцмана по переменным r и z , что является сложной задачей. Кроме того, как показывают результаты теоретических расчетов [2, 6, 23], при уменьшении радиуса электронного пучка и прочих равных условиях область перегрева сначала уменьшается, а затем перестает изменяться, ее размеры в этом случае характеризуются параметром $\sqrt{Dt_{эл}}$, где D — коэффициент тепловой диффузии. Требуемое время облучения одного элемента можно оценить по порядку величины из соотношения [2] $t_{эл} = L_0 h / p_0$, здесь L_0 — теплота испарения единичного объема материала пленки; h — глубина проплавленного отверстия; p_0 — плотность подводимой мощности. Итак, в соответствии с (2) для обеспечения надежного считывания необходимо облучать элемент в течение времени

$$t_{кр} = \frac{2L_0 C_{кр}}{p_0 \mu} = \frac{0,1 L_0}{p_0 \mu}. \quad (15)$$

В условиях наших экспериментов подводимая мощность не очень велика ($2 \cdot 10^{-4}$ Дж), т. е. величина размытия $\sqrt{Dt_{эл}}$ оказывается больше размеров сфокусированного до 30 нм зонда, поэтому разрешение обычно составляет 0,3 мкм. Учитывая, кроме того, невозможность ускорения и стирания записи, можно сделать вывод, что проплавление, по-видимому, неприемлемо для записи на сверхоптическом уровне, но может быть использовано для создания ПЗУ емкостью до $10^8 - 10^9$ бит/см².

Рассчитаем теперь дозу облучения, необходимую для надежного считывания записанной на пленку информации. В нашем случае регистрируются все прошедшие сквозь пленку электроны, поэтому [18]

$$I_s t_{эл} [e_0 (1 - \exp(-\mu H))]^{-1} \geq 100 C^2,$$

где I_s — ток зонда. Например, для $U_0 = 20 - 30$ кВ, $\mu = 14$ мкм⁻¹, $H = 0,1$ мкм величина $e^{-\mu H} = 0,25$, отсюда

$$I_s t_{эл} \geq 2 \cdot 10^{-17} C^2, \quad I_s t_k \geq 2 \cdot 10^{-11} C^2, \quad (16)$$

где t_k — время облучения кадра из 10^6 точек. Следовательно, при $C \approx 0,05$ и токах считывания порядка 10^{-12} А время облучения кадра составляет

50 мс, т. е. считывание возможно на телевизионной развертке. Из (16) следует, что для повышения контраста изображения необходимо увеличивать дозу облучения при считывании, однако при этом будет уменьшаться количество считываний, т. е. необходим компромисс между приемлемым контрастом и количеством считываний.

Заключение и выводы. Система «запись — воспроизведение» на основе РЭМ может оказаться перспективной при создании хранилищ больших массивов данных (архивных «банков»), а также для задач микрофильмирования и разработки больших поисково-информационных систем. Установка обеспечивает высокое качество восстановления изображения при весьма малых размерах носителя информации. Следует отметить также чистоту фона пленки-носителя, ее малую стоимость по сравнению с серебряными носителями, отсутствие операции проявления, что обеспечивает возможность осуществления процессов запись — воспроизведение в реальном масштабе времени.

Прогнозируется, что в основе вычислительных систем следующего поколения будут лежать не электрические, а оптические устройства. Оптические блоки памяти ЭВМ будут способны хранить миллиарды битов информации на квадратном сантиметре поверхности. В этом плане нетермическая электронно-лучевая запись на органических пленках-носителях может иметь определенный интерес как элемент реверсивной памяти емкостью до 10^{11} бит/см². Субмикронная запись может найти применение для создания дифракционных решеток любого профиля со сверхоптическим размером штрихов, разнообразных фильтров и т. п.

Помимо широких возможностей для компактного хранения текстовой информации и полутоновых изображений, создания запоминающих устройств представляется перспективным применение описанной схемы в микроэлектронике, в частности при машинном проектировании БИС и создании шаблонов с субмикронными размерами. Уменьшение линейных размеров структур на два порядка при нетермической электронно-зондовой обработке по сравнению с фотолитографическими способами позволит повысить плотность компоновки схем на четыре порядка. Программирование процесса электронно-зондового облучения и сканирования придает способу высокую гибкость при быстрой смене вида изображения, позволяя легко корректировать топологию проектируемой микроэлектронной схемы.

При решении задач поиска, выборки и совмещения, а также дальнейшего повышения быстродействия (технически вполне решаемые задачи) система открывает новые перспективы в информатике и микроэлектронике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шварц К. К., Готлиб В. И., Кристансон Я. Ж. Оптические регистрирующие среды. — Рига: Зинатне, 1976.
2. Зюбрик А. И. Материалы для оптической записи информации. — Львов: Изд-во Львов. ун-та, 1982.
3. Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. — Л.: Наука, 1983.
4. Вагин Л. Н. Голографические методы миниатюризации, копирования, хранения и воспроизведения документальной информации // Автометрия. — 1981. — № 1.
5. Kelly J. Recent advances in electron beam addressed memories // Advances in Electronics and Electron Physics. — 1977. — V. 43. — P. 43.
6. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. — М.: Энергия, 1980.
7. Mackin A. S. Holographic recording on electron beam colored sodium ohlorid crystals // Appl Opt. — 1970. — V. 9, N 7. — P. 1658.
8. Pooley D. Experiments relating to the effect of impurities on F-centre production in alkali halides // J. Phys. C. — 1968. — Ser. 2. — V. 1. — P. 323.
9. Ballesteros C., Llopis J., Piqueras J. Changes of cathodoluminescence emission from MgO in the scanning electron microscope // Sol. Stat. Com. — 1982. — V. 43, N 10. — P. 739.
10. Hirshberg Y. The photochemical memory // New Sci. — 1960. — V. 7, N 185. — P. 1423.

11. Сапарин Г. В., Обыден С. К., Четверикова И. Ф. и др. Об аномальной кинетике катодолюминесценции в GaN:Zn // Вестн. МГУ. Сер. физика — астрономия.— 1983.— Т. 24, № 3.
12. Церов А. П., Рау Э. И., Спивак Г. В., Чубаренко В. А. Эксперименты по нестандартным методам и особым типам контраста в РЭМ // Изв. АН СССР. Сер. физ.— 1983.— Т. 47, № 6.
13. Broers A., Pomerantz M. Rapid writing of fine lines in Langmuir-Blodgett films using electron beams // Thin Solid Films.— 1983.— V. 99.— P. 323.
14. Möllenstedt G., Schief R., Speidel R. Fernsehgesteuerte Elektronenstrahl — Mikroaufzeichnung // Optik.— 1968.— Bd 27.— S. 488.
15. Müller K. H. Elektronen-Mikroschreiber mit geschwindigkeitsgesteuerter Strahlführung // Optik.— 1971.— Bd 33.— S. 296.
16. Speidel R. Microrecording by electron beams in scanning systems // Proc. 5-th Europ. Congress on Electron Microscopy.— Manchester, 1972.
17. Рау Э. И., Савин Д. О., Спивак Г. В. Микрозапись и воспроизведение информации электронно-зондовыми сканирующими системами // Изв. АН СССР. Сер. физ.— 1984.— Т. 48, № 2.
18. Хейденрайх. Основы просвечивающей электронной микроскопии.— М.: Мир, 1966.
19. Christy R. W. Formation of thin polymer films by electron bombardment // J. Appl. Phys.— 1960.— V. 31.— P. 1680.
20. Жданов Г. С. Кинетика роста полимерной пленки на поверхности, облучаемой тонким электронным зондом // Физика и химия обработки материалов.— 1975.— № 5.
21. Самарский А. А. Введение в теорию разностных схем.— М.: Наука, 1971.
22. Fourie J. T. A theory of surface-originating contamination and a method for its elimination // SEM 79/II.— P. 87.
23. Макаревич В. С., Мейке А. В., Рубинов В. М. Тепловое воздействие электронного пучка на тонкую полупроводниковую пленку на подложке // Изв. АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук.— 1982.— № 1.

Поступила в редакцию 25 августа 1985 г.

УДК 616.07

И. Н. ТРОИЦКИЙ

(Москва)

ТОМОГРАФИРОВАНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИ ОДНОРОДНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛЕЙ

Постановка задачи. На практике часто встречаются такие ситуации, когда методы томографии привлекаются для анализа случайных полей. Тогда восстанавливаемая функция является некоторой конкретной реализацией данного случайного процесса. Для такой ситуации задача томографии состоит в том, чтобы по проекциям, регистрация которых в общем случае сопровождается наличием шумового фона, восстановить изображение, которое бы в среднем по некоторому выбранному критерию качества минимально отличалось от конкретной реализации наблюдаемого случайного поля. Данная работа ограничивается рассмотрением статистически однородных случайных полей, а в качестве критерия выбирается среднеквадратичное отклонение восстановленного изображения от истинной реализации.

Обозначения и исходные соотношения. При введении необходимых обозначений будем ориентироваться на те, которые были введены и подробно пояснены в [1]: $f(x, y)$ — функция, описывающая некоторую реализацию в сечении случайного поля плоскостью $\{x, y\}$; $K_f(x_1 - x_2, y_1 - y_2)$ — корреляционная функция поля $f(x, y)$; $G_f(\omega_1, \omega_2)$ — пространственный спектр поля $f(x, y)$; $R(s, \varphi)$ — проекция сечения $f(x, y)$ на ось s , которая по отношению к оси x повернута на угол φ ; $n(s, \varphi)$ — реализация шума, аддитивная по отношению к $R(s, \varphi)$; $n(s, \varphi)$, $R(s, \varphi)$ статистически не связаны между собой; $K_n(s_1 - s_2, \varphi_1 - \varphi_2)$ — корреляционная функция шума $n(s, \varphi)$; $g(\omega)$ — спектральная плотность шума по координате s ; $n_s(x, y)$ — реализация шума в плоскости $\{x, y\}$, соответст-