

### Список использованных источников

1. Ванга В.К. Исследование пространственно распределенных динамических систем методом вероятностного клеточного автомата //УФН, 1999.–т.169.–№5.–с.481–505.
- 2: Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Введение в синергетику.–М.:Наука, 1990.–272 с.
3. Грошковский Я. Техника высокого вакуума.–М.:Мир, 1975.–642 с.
4. Левич В.Г. Курс теоретической физики. т.1.–М.:Наука, 1969.–912 с.

## ЭНТРОПИЙНЫЕ МОДЕЛИ МИКРОТЕХНОЛОГИЙ

Коньгин С.Б., Саноян А.Г.

Для современных интегральных схем характерна чрезвычайно высокая упорядоченность материальных сред, обеспечивающих функциональное качество устройств /1/. В практическом плане это обстоятельство приводит к необходимости развития технологической базы, способной реализовать элементы конструкций субмикронных размеров /2/. Достигнутые и перспективные уровни микроминиатюризации оперируют с физическими объемами менее  $10^{-6}$  мкм<sup>3</sup>, что обуславливает проблематичность использования макроскопических подходов /3/ в конструкторско-технологической практике. В этой связи все большую роль приобретают вопросы обеспечения топологического и континуального порядка физических сред /4/, уровень проработки которых, как правило, недостаточен для практических целей. Состояние отмеченных выше моментов стимулирует развитие нетрадиционных моделей устройств микроэлектроники и микротехнологий, позволяющих объединить микро- и макроскопические подходы. Целью настоящей работы является разработка энтропийных моделей микротехнологий, основанных на базовых представлениях теории информации /5/, что обеспечило общность и универсальность конечных результатов, независимо от типа микроэлектронного устройства и микротехнологии его создания.

Пусть имеется некоторый объем физического пространства  $V$ , в пределах которого необходимо реализовать техническое устройство. Указанный объем представляется в виде совокупности упорядоченных ячеек размещения индивидуальных атомов. Имеется также рабочая среда, содержащая  $(m+1)$  типов атомов, как необходимых для создания устройства, так и примесной природы.

Процесс изготовления устройства состоит в размещении определенных типов атомов в ячейках размещения объема  $V$ . Результат размещения атомов считается удачным, если он обеспечивает появление необходимого функционального качества устройства. В принятой постановке под технологией следует понимать комплекс мер, направленных на повышение вероятности размещения необходимых типов атомов в определенных ячейках размещения объема  $V$ . Очевидно, что факту отсутствия

технологии как таковой ("случайная технология") соответствует множество реализаций размещения мощностью

$$N_c = (m+1)^N, \quad (1)$$

где  $N$  – количество ячеек размещения.

Наличие технологии обеспечивает избирательный характер размещения атомов, а следовательно, позволяет существенно уменьшить количество реализаций до уровня  $N_t \ll N_c$ . Понятие избирательности технологии включает не только фактор химического состава, но и структуры, что предполагает включение в указанную совокупность  $(m+1)$  типов атомов и микрообъектов типа атомной вакансии.

Как правило, не все реализации множества  $N_t$  обеспечивают необходимое функциональное качество устройства. Обозначим посредством  $N_i$  совокупности реализаций, обеспечивающих функциональное качество устройства. Тогда, в свете принятой модели изделия, практическая эффективность технологии (вероятность выхода годных изделий) будет всецело определяться степенью перекрытия множеств реализации  $N_t$  и  $N_i$ .  
*Показатели качества микротехнологий на микроскопическом уровне*

Рассматривая процесс размещения атома в индивидуальной ячейке объема  $V$  как случайное событие, для энтропии единичного размещения на атомном уровне имеем /5/:

$$h_i = - \sum_{i=1}^{m+1} p_i \lg p_i \quad (2)$$

где  $h_i$  – энтропия единичного размещения при наличии технологии;

$p_i$  – вероятность размещения атома  $i$ -го типа.

Введем в рассмотрение понятие избирательности технологии  $\alpha$  в виде отношения вероятности размещения нужного атома к суммарной вероятности размещения остальных типов атомов, выступающих в качестве нежелательной примеси. Тогда, с учетом допущения о равновероятности размещения примесных атомов для энтропии единичного размещения получаем:

$$h_i = \frac{\lg m + (\alpha + 1) \lg(\alpha + 1) - \alpha \lg \alpha}{1 + \alpha}, \quad (3)$$

Примем в качестве показателя качества технологии на атомном уровне параметр

$$K = \frac{h_c - h_i}{h_c}, \quad (4)$$

где  $h_c = \lg(m+1)$  – энтропия единичного размещения атома при случайной технологии.

В таблице 1 представлены значения рассмотренных показателей для случая  $m = 100$  в зависимости от уровня технологии (определение

параметра  $\alpha$  проведено на основании предельно допустимой концентрации примесных атомов).

Таблица 1 – Зависимость избирательности технологии  $\alpha$ , энтропии единичного размещения  $h_i$  и показателя качества технологии  $K$  от уровня технологии при  $m=100$

№ п/п	Уровень технологии	$\alpha$	$h_i$	$K$
1	Перспективный (микрорлектроника)	$10^{10}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$0,9^{(9)}$
2	Высокий (микрорлектроника)	$10^8$	$1 \cdot 10^{-7}$	$0,9^{(7)}$
3	Средний (машиностроение)	$10^4$	$6 \cdot 10^{-4}$	$0,9^{(4)}$
4	Низкий (легкая промышленность)	$10^2$	$4 \cdot 10^{-2}$	0,98
5	Сверхнизкий (строиндустрия)	$10^1$	$1 \cdot 10^{-1}$	0,93
6	Случайный (отсутствие технологии)	$10^{-2}$	$2 \cdot 10^4$	0
7	Биологический (ДНК)			
	а) на уровне нуклеотида	$>10^{10}$	$<1 \cdot 10^{-9}$	$>0,9^{(9)}$
	б) атомный уровень	$>10^{12}$	$<10^{-11}$	$>0,9^{(11)}$
8	Критический (флуктуационный)			
	а) $W = 1 \text{ эВ}$ , $T = 300 \text{ К}$	$10^{21}$	$2 \cdot 10^{-20}$	$0,9^{(20)}$
	б) $W = 1 \text{ эВ}$ , $T = 600 \text{ К}$	$10^9$	$1 \cdot 10^{-8}$	$0,9^{(8)}$
	в) $W = 0,5 \text{ эВ}$ , $T = 300 \text{ К}$	$10^9$	$1 \cdot 10^{-8}$	$0,9^{(8)}$
	г) $W = 0,5 \text{ эВ}$ , $T = 600 \text{ К}$	$10^5$	$1 \cdot 10^{-5}$	$0,9^{(4)}$

Примечание: запись вида  $0,9^{(3)}$  означает 0,999.

Первые две позиции таблицы 1 характеризуют соответственно перспективный и достигнутый уровни микротехнологий, используемых при создании интегральных схем. Данные позиций № 3, 4, 5 позволяют оценить достижения микрорлектроники по отношению к другим отраслям техногенной деятельности. Данные позиции № 7 (исходные атомно-молекулярные характеристики взяты из /6/) являются своеобразными ориентирами показателей качества антропогенных технологий. В позиции №8 приведены предельно достижимые энтропийные показатели в зависимости от температуры проведения технологических процессов и энергии активации элементарных физико-химических процессов. В последнем случае использованы допущения о термоактивационном характере элементарных процессов и распределение атомных частиц по энергиям согласно статистике Больцмана /3/. Данные позиции №8 свидетельствуют о проблематичности достижения избирательности  $\alpha > 10^8$  (характерной для устройств микрорлектроники) при температурах проведения технологических процессов более  $600^\circ \text{К}$  и энергиях активации  $0,5 \div 1,0 \text{ эВ}$ , типичных для большинства элементарных физико-химических процессов образования твердотельных структур.

*Энтропийные показатели микротехнологий на макроскопическом уровне*

Непосредственный анализ энтропийных показателей на макроуровне сопряжен со значительными трудностями, обусловленными необходимостью рассмотрения условных энтропий всевозможных реализаций атомных последовательностей длиной  $N$  /7/. Однако, учитывая тот факт,

что в реальной технологической практике микроэлектроники  $\alpha > 10^8$  и  $n > 10^6$  (при минимальном объеме элементов устройства более  $10^{-6}$  мкм<sup>3</sup>) воспользуемся допущением об энтропийной устойчивости технологических процессов. В этом случае, используя теорему об асимптотической равномерности реализаций [8], для энтропии устройства в целом, содержащего  $N$  атомов, имеем:

$$N_i = Nh_i = \lg N_i, \quad (5)$$

где  $N_i$  – мощность множества равновероятных реализаций, с учетом избирательного фактора технологии.

В таблице 2 представлены значения энтропии макроскопических объектов в зависимости от величины их объема и уровня технологии.

Таблица 2 – Зависимость энтропии макроскопических объектов  $H_i$  от их объема и уровня технологии при  $m=100$

№ п/п	Уровень технологии	Объем устройства			
		1 мм <sup>3</sup>	1 мкм <sup>3</sup>	10 <sup>-3</sup> мкм <sup>3</sup>	10 <sup>-6</sup> мкм <sup>3</sup>
1	Перспективный	1·10 <sup>15</sup>	1·10 <sup>3</sup>	1·10 <sup>0</sup>	1·10 <sup>-3</sup>
2	Высокий	1·10 <sup>17</sup>	1·10 <sup>5</sup>	1·10 <sup>2</sup>	1·10 <sup>-1</sup>
3	Случайный	1·10 <sup>24</sup>	1·10 <sup>12</sup>	1·10 <sup>0</sup>	1·10 <sup>6</sup>

На основании данных таблицы 2, используя выражение  $\lg N_i = H_i$ , можно определить количество реализаций  $N_i$  при создании микроэлектронных устройств. Определенный интерес представляют данные, относящиеся к объему  $V=10^{-6}$  мкм<sup>3</sup>, из которых следует, что микротехнологии позволяют реализовать вырожденный характер устройства, которому соответствует единственная конфигурация атомной структуры. Следует, однако, отметить, что с точки зрения практических интересов, вырожденный характер устройства может быть отнесен к единичному элементу конструкции, но не интегральной схеме в целом. В последнем случае ( $V > 1$  мкм<sup>3</sup>), количество реализаций достигает значений  $\lg N_i = 10^3 \div 10^5$ .

Использование допущения в форме выражения (5), приводит к равенству показателей качества технологии на микро- и макроскопических уровнях рассмотрения. Представляется очевидным, что в реальной производственной практике, показатель качества технологии на макроуровне должен быть непосредственно связан со сложностью изделия (см. ниже выражение (9)). С позиций энтропийного подхода, в качестве объективной меры сложности устройств следует принять показатель в виде:

$$C = \frac{H_c - H_i}{H_c}, \quad (6)$$

где  $H_c = \lg N_c$  – энтропия в отсутствии технологии как таковой;

$H_i = \lg N_i$  – энтропия реализаций, обеспечивающих функциональное качество устройств.

Определение параметра  $N_i$  относится к проблематике конструктора. Следует, однако, отметить, что в настоящее время конструктор не

готов к такой постановке вопроса, а оперирует макропараметрами материальных сред и устройств термодинамического характера. Подобный подход эффективен для устройств и технологий их создания при  $\alpha < 10^4$ , для которых не играют существенной роли эффекты флуктуационной природы. В этой связи для устройств микроэлектроники ( $\alpha > 10^8$ ) становится проблематичным использование в конструкторско-технологической практике представлений континуального характера /9/. Поэтому возможность объединения микро- и макроскопических подходов в рамках единой методологии рассмотрения является позитивным моментом энтропийных моделей микротехнологий.

#### *Энтропийные показатели реальных микротехнологий*

Ввиду сложности определения параметра  $N_i$  прямыми методами, проведем его оценку на основе имеющихся производственных показателей. Из всей совокупности последних, в качестве параметра, определяющего взаимосвязь между  $H_i$  и  $H_i$ , уместно рассмотреть вероятность выхода годных изделий  $P$ . Представляется очевидным, что  $P$  зависит от соотношения между избирательностью микротехнологии  $\alpha_i$  и избирательностью  $\alpha_i$ , заложенной конструктором изделия для безусловного ( $P=1$ ) достижения функционального качества устройства

$$P = \frac{\alpha_i}{\alpha_i} \quad (7)$$

С учетом выражения (3) и (7) для необходимой энтропии единичного размещения  $h_i$ , при условии  $\alpha_i \gg 1$ , имеем:

$$h_i = \frac{P}{\alpha_i} \lg \frac{m\alpha_i}{P} \quad (8)$$

В таблице 3 представлены значения параметров  $\alpha_i$  и  $h_i$ , в зависимости от уровня технологии и вероятности выхода годных устройств, при  $m=100$ . Согласно данным таблицы 3 следует, что достижение приемлемой эффективности производства микроустройств ( $P > 0,1$ ) возможно для изделий с показателями  $\alpha_i < 10^{11}$  и  $10^9$ , соответственно для перспективного и высокого уровней технологии.

Таблица 3 – Зависимость избирательности и энтропии единичного размещения  $h_i$  от уровня технологии и вероятности выхода годных устройств

№ п/п	Уровень технологии	Показатель	Вероятность выхода годных устройств				
			$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	0,5	1,0
1	Перспективный ( $\alpha_i=10^{10}$ )	$h_i$	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-11}$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$6,2 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$
		$\alpha_i$	$10^{13}$	$10^{12}$	$10^{11}$	$2 \cdot 10^{10}$	$10^{10}$
2	Высокий ( $\alpha_i=10^{10}$ )	$h_i$	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-8}$	$5,2 \cdot 10^{-8}$	$10^{-7}$
		$\alpha_i$	$10^{11}$	$10^{10}$	$10^9$	$2 \cdot 10^8$	$10^8$

В таблице 4 представлены искомые значения  $N_i$  в зависимости от объема микроустройства и вероятности выхода годных устройств, полученные на основании данных таблицы 3.

Таблица 4 – Зависимость количества реализаций  $N_i$  от объема и вероятности выхода годных устройств, при  $m=100$

№ п/п	Уровень технологии	Объем устройства	Вероятность выхода годных устройств				
			$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	0,5	1,0
1	Перспективный ( $\alpha_i = 10^{10}$ )	$1 \text{ мкм}^3$	31	(14)	(130)	(620)	( $10^3$ )
		$10^{-3} \text{ мкм}^3$	1,00	1,03	1,34	4,23	15,8
		$10^{-6} \text{ мкм}^3$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	Высокий ( $\alpha_i = 10^8$ )	$1 \text{ мкм}^3$	(130)	( $10^3$ )	( $10^4$ )	( $5 \cdot 10^4$ )	( $10^5$ )
		$10^{-3} \text{ мкм}^3$	1,34	15,8	(11)	(52)	( $10^2$ )
		$10^{-6} \text{ мкм}^3$	1,00	1,00	1,02	1,12	1,26

Примечание: запись вида (14) означает, что  $\lg N_i = 14$ .

Наличие в таблице 4 значений  $N_i$ , близких единице свидетельствует о том, что для данных позиций конструктором закладывается, а технологом реализуются (при указанной вероятности выхода годных устройств) практически вырожденные конструкции, которым соответствует единственная реализация размещения атомов. В то же время следует отметить, что для современных устройств микроэлектроники ( $V > 1 \text{ мкм}^3$ ) количество реализаций  $N_i$  при  $P > 0,1$  достигает значений  $N_i > 10^{130}$ .

На основании выражений (4), (6) и (7) получаем:

$$P = \frac{1-C}{1-K}. \quad (9)$$

Последнее выражение устанавливает эффективность согласования конструкторских решений (параметр  $C$ ) с технологическими возможностями изготовления (параметр  $K$ ) устройств, для типичных производственных ситуаций, удовлетворяющих условию  $H_i > H_c$ .

*Информационный потенциал и дефицит микротехнологий*

В соответствии с общими концепциями теории информации [5], в качестве информационного потенциала микротехнологий следует рассматривать параметр вида:

$$I = H_c - H_i, \quad (10)$$

где, в отличие от вышеизложенного, целесообразно рассматривать энтропии преобразования единичного объема физического пространства. В этом случае параметр  $I$  выступает в качестве объективной меры абсолютного уровня достижений технологии в историческом разрезе, т.е. с учетом всего практического опыта, накопленного человечеством до настоящего момента времени. Однако, в повседневной практике технолога интересует не столько информационный потенциал, сколько информационный дефицит  $\Delta I$ , ограничивающий выход годных изделий:

$$\Delta I = H_i - H_j. \quad (11)$$

С учетом выражений (4), (5), (6) и (9) имеем:

$$\Delta I = N h_i (1 - P). \quad (12)$$

Устранение информационного дефицита достигается посредством расширения метрологического обеспечения технологии. Отсюда следует, что минимальное количество метрологических операций, устраняющих информационный дефицит технологии, составит:

$$n = \frac{\Delta I}{I_i}; \quad (13)$$

где  $I_i$  – информационная емкость единичной метрологической операции. Устанавливая параметр  $I_i$  в виде /10/:

$$I_i = \lg \frac{L}{l}, \quad (14)$$

где  $L$  и  $l$  – соответственно диапазон измерения и погрешность измеряемой величины, и используя выражения (12) и (13) получаем

$$n = \frac{N h_i (1 - P)}{\lg \frac{L}{l}} \quad (15)$$

(Для проведения количественных оценок можно использовать усредненное значение  $\lg(L/l)=6$ , характерное для всех отраслей технической деятельности). Параметр  $n$  определяет необходимую меру информационных потоков в системе «рабочая среда - технология - изделие» с целью обеспечения негэнтропийного /11/ принципа создания техногенных объектов. В частности, для устранения информационного дефицита технологии при производстве микроустройства объемом в  $V=1$  мкм<sup>3</sup> с вероятностью выхода годных  $P=0,5$ , с целью обеспечения  $P=1$ , потребуется количество метрологических операций  $n$  порядка  $10^2$  и  $10^4$ , соответственно для перспективного и высокого уровней технологии.

Рассмотренные энтропийные модели устройств и технологий наиболее эффективны в приложении к изделиям высокой сложности, характерной для микроэлектроники. С точки зрения практических интересов, представленные материалы позволяют оценить предельные возможности микротехнологий и целесообразный уровень сложности (упорядоченности) устройств микроэлектроники, обеспечивающий приемлемые производственные показатели.

Дальнейшее развитие энтропийного подхода предполагает отказ от гипотезы равновероятности индивидуальных реализаций в пределах множества  $N_i$ , в пользу использования гауссового распределения последних /12/. В этом случае следует ожидать некоторого смягчения требований к параметру  $\alpha_i$ .

Существенный интерес представляет рассмотрение вопросов корреляции при размещении индивидуальных атомов. Однако, несмотря на значительные достижения по данному вопросу в математическом плане /7/, на этом пути имеются определенные трудности физического характера, обусловленные отсутствием уверенных данных о корреляционных функциях в конденсированных средах.

#### Список использованных источников

1. Валиев К.А., Орликовский А.А. Развитие элементной базы высокопроизводительных ЭВМ // Информационные технологии и вычислительные системы. 1996. № 2. С. 26-47.
2. Валиев К.А. Физика субмикронной литографии. М.: Наука. 1990. 528 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Часть I. М.: Наука. 1976. 584 с.
4. Займан Дж. Модели беспорядка. Пер. с англ. М.: Мир. 1982. 592 с.
5. (Ziman J.M. Models of disorder. Cambridge: University Press. 1979).
6. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетики. Пер. с англ. М.: ИЛ. 1963. 547 с. (Shannon C.E. Recent development in communication theory. Electronics. April. 1950)
7. Волькенштейн М.В. Молекулярная биофизика. М.: Наука. 1975. 616 с.
8. Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. М.: Наука. 1969. 400 с.
9. Стратанович Р.Л. Теория информации. М.: Сов. радио. 1975. 424 с.
10. Седов Л.И. Механика сплошной среды. Т.1. М.: Наука. 1994. 528 с.
11. Новицкий П.В. Основы информационной теории измерительных устройств. Л.: Энергия, 1968. 248 с.
12. Бриллюэн Л. Наука и теория информации. Пер. с англ. М.: Физматгиз. 1960. 392 с. (Brillouin L.J. Science and information theory. Academic Press. Inc. Publishers. N.Y. 1956.)
13. Стратанович Р.Л. Количество информации и энтропия отрезков стационарных гауссовых процессов // Проблемы передачи информации. 1967. Т.3. вып.2. С 92-104.

УДК 557.73

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПАМЕЛЫ

Литвинов В.В., Помельников Р.А.

В настоящее время все чаще используются сложные системы постоянных магнитов для проведения научных экспериментов на борту космических аппаратов. Их применение приводит к ряду проблем. Главная из них – это магнитная совместимость с бортовой аппаратурой. В данной работе производится расчёт магнитной системы "Памела", с целью выяснения её совместимости с системой СКМ и определение месторасположения магнитных датчиков.

Магнитная система "Памела" состоит из пяти магнитных модулей (рис.1).