

Г.С. КАРАЯН, Ш.Ж. МАРТИРОСЯН

**ФОТОУПРАВЛЯЕМЫЙ ДВУХОПЕРАЦИОННЫЙ ЗАПОМИНАЮЩИЙ
БИПОЛЯРНЫЙ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ЭЛЕМЕНТ**

Показана возможность создания запоминающего многозначного полупроводникового элемента с двусторонним оптическим управлением. Установлено, что для обеспечения противоположных действий входных сигналов на вольт-амперную характеристику необходимо создать на поверхности второй базы дополнительную $p^+ - n - p$ -структуру.

Ключевые слова: полупроводниковый прибор, электронно-дырочная плазма, электропроводимость, моделирование, оптическое многоканальное управление, биполярная полупроводниковая структура, мультистабильный элемент, двухоперационный прибор.

Введение. Различают следующие основные пути развития информационно-вычислительных технологий:

а) повышение производительности традиционного метода обработки информации на основе использования нанотехнологий, при этом перевод неполиномиальных алгоритмов в полиномиальные принципиально невозможен;

б) некогерентно-коррелированный метод обработки информации нейросетями, допускающий процесс обучения, а следовательно, и создание искусственного интеллекта;

в) квантовый принцип обработки информации, позволяющий перевод неполиномиальных алгоритмов в полиномиальные и моделирование квантовых процессов, но несостоятельный для обучения (см. [1] и цитированные там работы).

Последние два метода, по существу, многозначные и используют многозначную логику. Однако нейроинформатика развивалась на основе формального нейрона без непосредственного участия самого многозначного элемента (он не существовал). Квантовая обработка информации производится в трудновыполнимых условиях, и пока удастся квантовую корреляцию наложить между почти сорока кубитами. В связи с этим в [2] предложен промежуточный и расширенный, в смысле логики, альтернативный способ обработки информации логической системой L_p , состоящей из пяти различных полупроводниковых многозначных элементов-полисторов. Установлено, что система полисторов L_p полна и замкнута для выполнения всех арифметико-логических операций в p -ичной системе ($p > 2$). Все эти полисторы являются оперативными в том смысле, что после выключения управляющих сигналов происходит переход в исходные состояния. На пути создания многозначных компьютеров и нейросетей нужно иметь элемент памяти, реализация которого, очевидно, была бы оптимальной,

если вместо полисторной схемы памяти систему L_p дополнить одним запоминающим полистором. Целью данной работы является разработка принципа работы и моделирование одного варианта запоминающего полистора на основе полупроводниковой биполярной структуры. При этом требуется, чтобы моделируемый полистор был технологически совместим с другими полисторами L_p , а также имел входы управления для выполнения операций двух типов: прямой операции, когда под действием записываемого информационного сигнала полистор из “нулевого состояния” переходит в соответствующее состояние, в котором остается и после выключения управляющего сигнала сколь угодно долго; обратной операции, когда полистор под действием запирающего сигнала возвращается в “нулевое состояние”. Управление электрическим сигналом формально можно считать частным случаем оптического.

В настоящей работе исследуется возможность двустороннего управления состояниями мультстабильной электронно-дырочной плазмы (ЭДП) в биполярных полупроводниковых структурах.

1. Принцип работы запоминающего полистора. Предъявляемые к новому полупроводниковому прибору памяти требования мультстабильности и технологической совместимости с полисторами системы L_p позволяют взять за основу биполярную структуру (рис.1). Для этой структуры вопросы мультстабильности, технологической совместимости и оперативного управления решаются по развитым в [3,4] методам. Для нашей задачи определению подлежат принципы запоминания и двустороннего (двухоперационного) управления состояниями с помощью одностипных сигналов. Задачи эти нетривиальные, и для выполнения двустороннего управления нами предлагается структурное решение. Известна возможность (см., например, [4]) “нечетного” управления, когда управляющие сигналы противоположных знаков приводят к противоположным изменениям характеристик. Такой подход обладает рядом недостатков. Во-первых, для его осуществления необходимо иметь источники напряжения двух полярностей, использование которых нежелательно в больших интегральных схемах. Во-вторых, в случае оптического управления просто невозможно иметь потоки отрицательной интенсивности.

Поэтому, чтобы электрические сигналы из разных входов изменили вольт-амперную характеристику в противоположные стороны, можно воспользоваться дополнительной структурой, созданной в квазинейтральной базе входных каналов (вторая база справа на рис.1а).

Основываясь на кинетических и полевых свойствах ЭДП, в рассматриваемой структуре нетрудно установить физический принцип двустороннего управления.

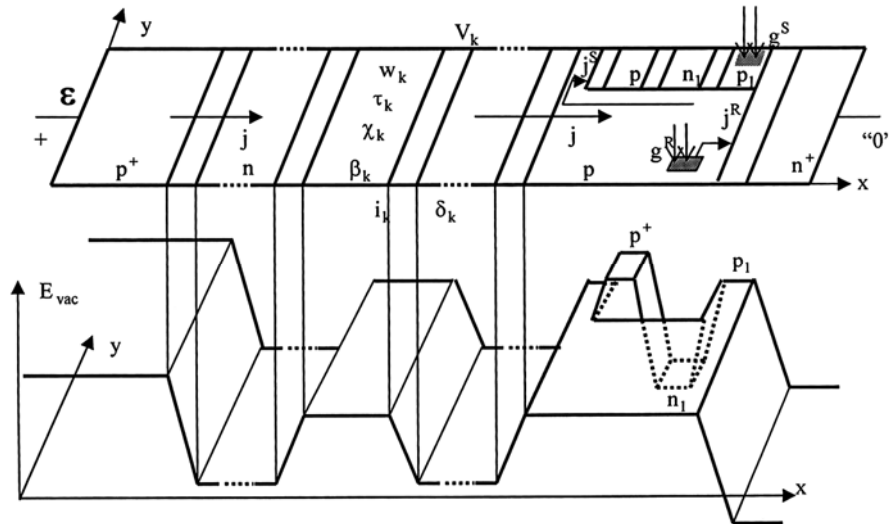


Рис. 1. Расчетная модель (а) и энергия вакуума двухоперационного полистора (б)

Действительно, во второй квазинейтральной базе в результате действия суммарного управляющего сигнала j^c возникают избыточные неравновесные носители. Они дополнительно нейтрализуют объемный заряд ионизированных доноров в первом прямосмещенном переходе (в случае оптического управления также во втором переходе).

Если суммарный ток управления j^c положителен (т.е. имеет направление тока во внешней цепи), то он вызывает дополнительные изменения боковых токов в сторону их повышения, а отрицательный ток j^c приводит к понижению. В рассматриваемой структуре положительность или отрицательность знака электронного тока j^c означает, соответственно, ввод или вывод из базы этого составляющего тока. Показанный на рис.1 “прямой” поток интенсивностью g^R создает положительный ток $j^c = j^R$, а “косвенный” поток интенсивностью g^S - отрицательный ток $j^c = -j^S$. Знак j^c в случае одновременного действия потоков g^R и g^S зависит от значений последних, так как $j^c = j^R - j^S$.

Энергия вакуума равновесного состояния ЭДП в структуре представлена на рис. 1б. При приложении внешнего напряжения по цепи с ЭДС E и сопротивлением R_N барьеры с отрицательными градиентами уменьшаются, а с положительными - увеличиваются. Последние разделяют ЭДП на слабосвязанные, почти отдельные коллективы частиц. При определенном значении суммы боковых токов обратносмешанных переходов происходит инверсия знака напряжения [3]. При этом энергия вакуума деформируется в равновесное, а потом и в состояние с отрицательным градиентом. Тогда

разделенные им два соседних коллектива ЭДП сливаются в единый коллектив. При наличии барьера во втором переходе ($-V_2$) частицы ЭДП в разных его сторонах связаны лишь прошедшими над барьером частицами, количество которых пропорционально $\exp(-eV_2 / kT)$, т.е. практически разделены. После исчезновения разделяющего барьера ЭДП, пространственно расположенная в области вплоть до четвертого перехода, включая односвязанный, составляет единый коллектив, в котором процессы в разных ее частях взаимосвязаны. Физические процессы в первом переходе и во второй базе влияют также на процессы в третьей базе и четвертом переходе. Это влияние распространяется двумя конкурирующими механизмами. Первый из них основан на известном транзисторном эффекте, а второй - на эффекте плазменно-полевого взаимодействия (ЭППВ) [3,4].

Так как распределения распространяются переносом частиц ЭДП и полями, то установление стационарного поля информации обуславливается тем процессом, который протекает быстрее другого. Однако ЭППВ действует только в тех частях ЭДП, в которых отсутствуют барьеры с положительными градиентами. Следовательно, управление состояниями электропроводимости ЭДП в полистере можно осуществлять посредством управления границами действия ЭППВ. В рассмотренном выше случае ЭППВ переносит информацию о процессах в первом эмиттере и во второй базе во всю свою область действия. Следовательно, состояния электропроводимости ЭДП управляются именно этими процессами.

Соответствующие математические условия будут сформулированы в следующем разделе. Обсудим один простой способ осуществления управления в обратную сторону. Этой цели можно достигнуть путем вывода со второй базы подвижных частиц ЭДП, препятствуя нейтрализации ими зарядов ионизированных примесей. Иными словами, нужно реализовать утечку тока со второй базы, т.е. зашунтировать первый $p-n$ - переход. При этом шунт должен быть управляемым сигналом j^S того же типа, что и ток прямого управления прибора j^R . Такую роль может играть $p_1^+ - n_1 - p_1 - n^+$ - тиристор, шунтирующий первый переход. В действительности это будет прибавление некоторых определенных областей n - и p - типов во второй базе (рис.1). Управляющий сигнал j^S переводит эту дополнительную структуру в низкопроводящее состояние, поэтому и происходит снос некоторой части бокового тока для второго перехода. Если этого достаточно для запираения второго перехода, то возникающий барьер сузит область действия ЭППВ, и ВАХ будет деформировать в обратную сторону (рис. 2, кривая 4).

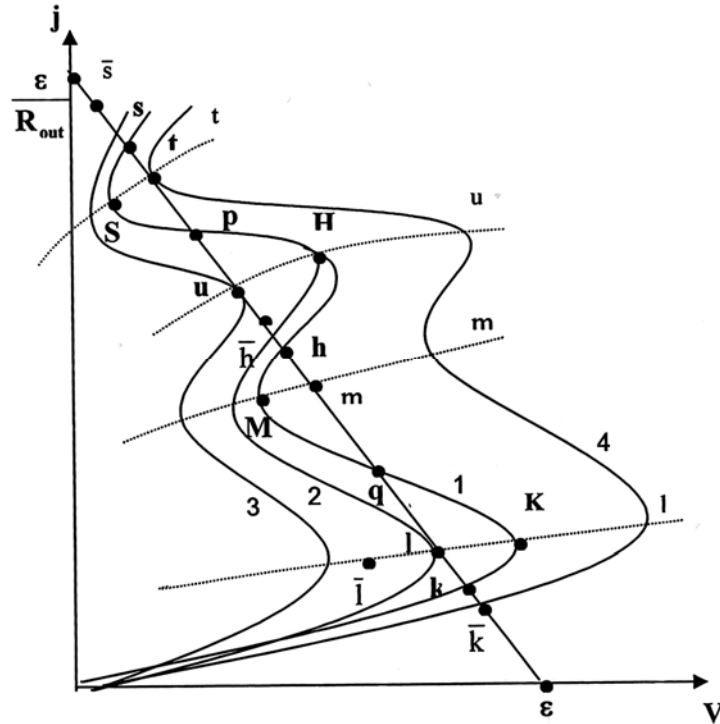


Рис. 2. Семейство вольт-амперных характеристик запоминающего полистора. Кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют случаям $j^c = 0$; $j^c = j_l$; $j^c = j_u$; $j^c = -j^s = j_k^c$. Кривые l, m, u, t представляют траектории точек K, M, H, S. Строчные буквы на нагрузочной линии указывают различные состояния полистора

2. Математическая модель запоминающего полистора. Как и в случае оперативных полисторов для арифметико-логических устройств, здесь за основу принимается биполярная структура с высоколегированными базами (для пренебрежения падением напряжения на них при низком уровне инжекции) с длинами баз w_k , условием $l_k < w_k \ll L_k$, где l_k и L_k - соответственно длины свободного пробега и диффузии. Тогда решение совместной системы уравнений кинетики и электростатики при постоянной температуре T приводит к "темновой" ВАХ $V = \sum V_k(j)$ в параметрической форме [3,4]:

$$j_i^D = \sum_{k=1}^N c_{ik} x_k, \quad (1)$$

$$c_{ik} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\delta\sqrt{1+x_1}}{x_1} & \beta_2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \beta_2 & i_2 + \frac{\delta_2}{x_2} & \beta_3 i_3 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \beta_{N-1} i_{N-1} & i_{N-1} + \frac{\delta_{N-1}}{x_{N-1}} & \beta_N i_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & \beta_N i_N & i_N \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$x_k \equiv (-1)^k \{1 - \exp[(-1)^{k+1} V_k]\}. \quad (3)$$

Здесь напряжения измерены в единицах $K_B T/e$, а плотность тока - в единицах i_1 ; β_k - коэффициент переноса по k -й базе; i_k - плотность тока насыщения k -го перехода.

Следуя [3,4], генерационно-рекомбинационные процессы в объемах электронно-дырочных переходов представим в виде

$$\delta_k(V_k) = \sigma_k V_k + \frac{en_i}{\tau_k + \tau_{k+1}} \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(x_k + x_{k+1})}{e\chi_k\chi_{k+1}}} \sqrt{V_k}; \quad k = 2m, \quad (4)$$

где n_i - собственная концентрация носителей; ε - диэлектрическая проницаемость; ε_0 - электростатическая постоянная; τ_k - времена жизни неосновных носителей; χ_k - концентрация примесей в k -й базе.

Рекомбинацией не пренебрегаем только в первом переходе с коэффициентом δ . Это означает, что в структуре имеется единственный источник обратной связи, область действия которого и будет управляться при помощи ЭППВ.

Все эти физические коэффициенты выражаются структурными технологическими параметрами [3,4]. Недиagonальные члены в нечетных строках матрицы $\{c_{ik}\}$ представляют ЭППВ, которые только при определенных условиях способны обеспечить многоуровневость ВАХ (1).

Для конкретности рассмотрим трехуровневый элемент памяти на основе шестислойной структуры с крайними омическими контактами. Для этого необходимо выполнение условий:

$$\beta_2 + \beta_3 - 1 \equiv \beta_2^* > 0; \quad (4) \beta_4 + \beta_5 - 1 < 0 < \beta_4 + \beta_5 - 1 + \Delta\beta_4; \quad \Delta\beta_4 = \frac{\beta_3\beta_4 i_3}{i_4} \beta_2^*. \quad (5)$$

Эта структура описывается 20-ю параметрами $(\chi_k, \tau_k, w_k, \tau_k)$, выбором которых должно выполняться соотношение (4).

Кривая 1 на рис 2 представляет ВАХ (1), которая при внешней цепи

$$E = V + jR_{out} \quad (6)$$

имеет три устойчивых “запоминающих” (k, h, s) и два неустойчивых (p, q) состояния.

Нашей целью является представление принципа работы запоминающего полистора. В высоколегированной второй базе пренебрегаем эффектами топологических неоднородностей, чтобы действие управляющего воздействия учитывалось аддитивно (по закону Кирхгофа). В случае оптического управления решение уравнения непрерывности при однородном поглощении света приводит к следующим формулам для токов управления эмиттерным $j_{эм}^c$ и коллекторным $j_{кол}^c$ переходами:

$$j_{эм}^c = j^R = -\frac{2i_{02}L_2^2}{\bar{Y}_2} \operatorname{sh} \frac{(z_2 - z_1)}{2L_2} \left(\operatorname{sh} \frac{w_2 - \bar{z}}{L_2} + a\beta_2 i_1 \operatorname{sh} \frac{\bar{z}}{L_2} \right) g^R, \\ j_{кол}^c = \alpha j_{эм}^c; \quad \alpha = \frac{\beta_2 i_1}{i_{02}} \operatorname{sh} \frac{\bar{z}}{L_2} \left(\operatorname{sh} \frac{w_2 - \bar{z}}{L_2} + a\beta_2 i_1 \operatorname{sh} \frac{\bar{z}}{L_2} \right)^{-1}, \quad (7)$$

где $\bar{Y}_2$ – равновесная концентрация неосновных носителей во второй базе; z_1 и z_2 – координаты границ; $a \bar{z} = (z_1 + z_2)/2$ – координата центра оптического окна в направлении OZ; g^R – интенсивность фотогенерации носителей, которая пропорциональна интенсивности пучка. Параметрическая ВАХ имеет вид

$$\{j_1 = j_1^D - j^R + j^S = j_1^D - j^c; \quad j_2 = j_2^D + \alpha j^R; \quad j_i = j_i^D \text{ при } i \neq 1, 2. \quad (8)$$

Здесь j^S вызвана током шунта $J^S = S j^S$, который определяется системой уравнений

$$\begin{cases} J^S = i_1^S S^S \left[i_1 (e^{V_1^S} - 1) + \delta_{11}^S e^{V_1^S/2} - \beta_2^S (1 - e^{-V_2^S}) - j_{1c}^S \right] \\ J^S = S^S \left[\beta_2 i_1 (e^{V_1^S} - 1) + \beta_3 i_3 (e^{V_3^S - 1}) + j_{2c}^S \right] \\ J^S = S^S \left[i_3 (e^{V_3^S} - 1) + \beta_3 i_3 (1 - e^{-V_2^S}) \right] \\ V_1^S + V_2^S + V_3^S = V_1; \quad \beta_2^S + \beta_3^S > 1. \end{cases} \quad (9)$$

Система уравнений (9) представляет семейство ВАХ шунта. Если, с учетом определенных условий, на основе ВАХ (3) найти V_1 и j^S (т.е. J^S), то, по аналогии с (7), можно найти j_{1c}^S и j_{2c}^S . В дальнейшем изложении будем говорить только об определении j^S . Противоположность знаков j^R и j^S в первом уравнении системы (8) показывает, что осуществляется двустороннее управление. С другой стороны, первое уравнение системы (9) показывает, что это осуществляется однотипным с j^R , в смысле знака, сигналом j_{1c}^S . Семейство ВАХ рассматриваемой структуры для разных значений j^R и j^S качественно показано на рис.2. Пунктирные кривые представляют траектории точек экстремумов ВАХ на плоскости (V, j). Легко установить, что они являются

монотонно возрастающими, если отсутствует процесс лавинного умножения за счет ударной ионизации (в нашем случае это условие выполняется из-за высокой примеси баз). Из систем уравнений (1), (2), (8) и условия

$$\frac{\sum dV_k(j, j^c)}{dj} = 0 \quad (10)$$

можно получить уравнения этих траекторий в параметрической форме:

$$V_v = V_v(\xi_p, j^c), \quad j_v = j_v(\xi_q, j^c), \quad (11)$$

где $v = K, M, H, S$ (см. рис. 2); $j^c \equiv j^R - j^S$; ξ - набор физических коэффициентов структуры (их можно выразить структурными параметрами прибора).

Теперь сформулируем те дополнительные условия, которые эту структуру превратят в запоминающий элемент для системы L_p [2,3]. Эти условия можно разбить на три класса: существования, функционирования и упорядочения.

Условия существования (соотношения (6), $\delta_1 \neq 0$; $\delta_{2k+1} \neq 0$) дополним условием принадлежности устойчивых “рабочих” точек (состояний) темновой ВАХ нагрузочной линии. Это эквивалентно утверждению, что при $j^c = j^R - j^S = 0$ максимумы ВАХ расположены “сверху” нагрузочной линии (рис. 2, точки К и Н), точки минимумов - “внизу” (точки М и S), а условия

$$E - R_{out} j_M(\xi, 0) > V_h > E - R_{out} j_H(\xi, 0) \quad (12)$$

обеспечивают наличие запоминающего состояния h на рис. 2. Соотношения типа (12) имеют место для всех запоминающих состояний.

Для представления условия функционирования следует найти критические значения сигнала управления $j_v^c (v = l, m, u, t)$, когда траектории точек экстремумов (11) пересекаются с линией $(E, E/R_{out})$ (решением системы уравнений (8) и (11) при $j^c = j_v^c$), и установить значения j_v^c . Очевидно, что для точек максимумов и минимумов следующие неравенства обеспечивают соответственно функционирование режимов “запись” и “стирание” полистора:

$$j_l^c < j_u^c < \dots; \quad j^c \geq j_t^c = \sup(j_t^c, j_m^c \dots). \quad (13)$$

Качественно результаты действия неравенств (13) представлены на рис. 2. Например, если полистор находится в состоянии k (кривая 1), то после включения $j^c > j_l^c$ точка К переходит через точку l в точку $\bar{l}$, а состояние k становится невозможным из-за внешней цепи. Тогда состояние h преобразуется в состояние $\bar{h}$, т.к. при $j^l < j_h^l$ ЭППВ не действует. Полистор переходит в состояние $\bar{h}$, а после выключения j^c - в состояние h и остается там сколько угодно долго из-за устойчивости этого состояния. В этом случае k снова становится возможным, но переход $h \rightarrow k$ спонтанно запрещен. По существу, это условие должно быть обеспечено как условие надежности. Здесь

это не принципиально и можно считать выполненным. Если $j^c > j_u^c$, невозможными становятся состояния k и h , а полистор переходит в состояние s , которое образуется из-за действия ЭППВ.

При $j^c = -j^s < -j_t^c$ из-за внешней цепи становятся невозможными все состояния полистора, кроме $\bar{k}$, куда и переходит полистор. После выключения j^s он снова переходит в состояние k .

Как и в случае системы L_p , здесь ограничимся линейным (эквидистантным) упорядочением, выражая при этом все уровни с номерами состояний полистора. Далее ограничимся упорядочением по выходному напряжению, т.е.

$$V_s \ll V_k - V_h = V_h - V_s \equiv \Delta V = \text{const}. \quad (14)$$

Неравенство в (14) необязательно, но удобно, тем более при $V_s \rightarrow 0$. Для входных токов управления примем условия

$$j_i^R = (i-1)j_0^R; \quad i = 1; 2; 3; 4; \dots$$

Соотношения (6), (8), (12)-(14) обеспечивают свойства полистора быть двухоперационным и запоминающим, но неоднозначно, т.к. число параметров, определяющих структуру, превосходит число определяющих их соотношений.

3. Резюме. Таким образом, воздействие внешнего сигнала через дополнительную внутреннюю входную структуру расширяет возможности управляемости, что достаточно как для создания основного элемента статической памяти запоминающего полистора, так и для двустороннего управления состояниями мультстабильной ЭДП вообще. На основе последнего свойства можно моделировать оперативный полистор, способный на выходе образовать разность двух p -ичных чисел. Поэтому двухоперационные запоминающий и оперативный полисторы составляют оптимальную элементную базу не только для многозначных нейросетей, особенно при выполнении рекурсивных алгоритмов обучения и распознавания образов. Исследования динамических и энергетических свойств предложенного двухоперационного полистора выходят за рамки настоящей работы, но можно привести некоторые грубые оценки. Выделяемая источником полная мощность W_p на p -уровневом полисторе имеет порядок $W_p \approx pV_c \Delta j$, величину которой можно минимизировать выбором произведения $(V_c \Delta j)$. Рассеиваемая на структуре джоулева мощность слабо зависит от номера состояния и достигает своего максимального значения в состояниях, близких к $p/2$, и имеет порядок величины $W_k/2$.

По величинам времен переключений рассмотренный здесь запоминающий полистор уступает традиционным транзисторам, но взамен этого допускает более эффективный и быстрый алгоритм поиска как по адресу, так и по "содержанию".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Valiev K.A., Kokin A.A.** Semiconductor Nuclear Magnetic Resonance Quantum Computers with individual and ensemble reference to Qubit// Microelectronics.-1999.- V. 28, N 5.-P. 326-337.
2. **Karayan H.S., Martirosyan Sh.J.** About one Logic Structure and its Realization// Algebra, Geometr and theirs applications, Seminar Proceeding. - 2001. - V. 1.- P. 54-57.
3. Karayan H.S., Physical properties inhomogeneous semiconductor structures //PTS.- 1985.- 19, N 4. – P. 1367-1368.
4. **Karayan H.S., Makaryan A.H., Yolchyan R.A., Martirosyan Sh.J., Khudabashyan M.A.** About Multi-stable bipolar structure Approximation by System of Virtual bi-stable Semiconductor Elements // 1st IEEE International Conference on Circuits and Communications, Proceedings.-St. Petersburg, 2002.-P. 392-395.

ЕГУ. Материал поступил в редакцию 30.09.2005.

Հ.Ս. ԿԱՐԱՅԱՆ, Շ.Ճ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

ԵՐԿԳՈՐԾԱՌՈՒՅԹ ԼՈՒՍԱԿԱՌԱՎԱՐՎՈՂ ԵՐԿԲԵՎԵՆ ԿԻՍԱՀԱՂԱՌԴՉԱՅԻՆ ՀԻՇՈՂ ՏԱՐԲ

Ցույց է տրված օպտիկական կառավարմամբ երկգործառույթ (երկօպերացիոն) կիսահաղորդչային բազմարժեք հիշող սարքի ստեղծման հնարավորությունը: Հաստատված է, որ վոլտամպերային բնութագծի վրա մուտքային ազդանշանների հականշական ազդեցության համար անհրաժեշտ է երկրորդ բազայում ստեղծել լրացուցիչ $p^+ - n - p$ կառուցվածք:

Առանցքային բառեր. կիսահաղորդչային սարք, էլեկտրոնախոռոչային պլազմա, էլեկտրահաղորդականություն, մոդելավորում, օպտիկական կառավարում, երկբևեռ կիսահաղորդչային կառուցվածք, բազմավիճակ տարր, երկգործառույթ սարք:

H.S. KARAYAN, SH.J. MARTIROSYAN

PHOTOCONTROLLED TWO-OPERATIONAL STORAGE BIPOLAR SEMICONDUCTOR ELEMENT

The possibility to develop storage multiple semiconductor element with two-operational optical control is discussed. It is established that for providing the opposite action of input signals on volt-ampere characteristic it is necessary to form a supplementary $p^+ - n - p$ structure.

Keywords: semiconductor device, electro (n) plasma, electric conductivity, modeling, optical multichannel control, bipolar semiconductor structure, multistable element, two-operational device.