Известия НАН Армении, Физика, т.39, №4, с.242-248 (2004)

УДК 621.382.2

ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВУЮ МУЛЬТИСТАБИЛЬНУЮ СТРУКТУРУ

Ш.Ж. МАРТИРОСЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 22 марта 2004 г.)

Рассмотрено воздействие нескольких оптических сигналов на электропроводность мультистабильных биполярных полупроводниковых структур. Найдены те достаточные условия, при которых влияния входных сигналов эквивалентны (условия коммутативности входов). Установлено, что со второй базы можно осуществлять многовходное оптическое управление всеми состояниями структуры с сохранением свойства эквивалентности.

1. Введение

В различных областях науки и техники, особенно в автоматике, кибернетике и информационно-вычислительных технологиях все чаще появляется необходимость в многоканальном управлении состоянием системы дискретным набором внешних воздействий, в частности, оптических.

Интерес к оптическому управлению вызван несколькими причинами. Во-первых, исчезают ограничения, наложенные гальваническими связками, межэлементными соединениями и RC-задержками в интегральных схемах. Во-вторых, в отличие от электрического, оптический сигнал можно модулировать сразу по нескольким параметрам (по интенсивности, частоте, поляризации и т.д.). В-третьих, можно уплотнить информацию в несущем сигнале, что приводит к значительному повышению эффективности в информационно-вычислительных технологиях [1]. И наконец, наиболее важными являются последние достижения в области физических технологий, в частности, нанотехнологий. Именно здесь стало наиболее возможным создание интегральных систем полупроводниковых оптопар, обладающих огромными перспективами в информационно-вычислительных цифровых технологиях [2].

Однако на пути реализации такой программы возникает ряд технических проблем, нуждающихся в решении. Многоканальное управление нужно для значительного упрощения схемотехники при фиксированном функциональном свойстве физической системы. Требование функциональной универсальности приводит к идентичному назначению всех каналов, сохраняя при этом их невзаимосвязанность. Конечно, последнее свойство можно удовлетворить и в случае электрического управления, но ценой сильного

усложнения технологий для обеспечения взаимоизоляции каналов. Оптическое управление, помимо выше перечисленных, здесь также имеет очевидное преимущество. Единственным препятствием остается обеспечение равных весов (и коммутативности) каналов, так как, с одной стороны, размеры оптических окон желательно сделать не меньше длин волн фотонов, а с другой стороны, во избежание неоднородного поперечного распределения плотности тока из-за флуктуационной неустойчивости в мультистабильной электронно-дырочной плазме (ЭДП) необходимо, чтобы поперечные размеры не превосходили некоторые критические значения, установленные в работах [3,4]. Поэтому на первый план выдвигается вопрос влияния оптической информации, поступающей через оптические окна биполярной полупроводниковой структуры с мультистабильной ЭДП, на функционирование этой структуры. Исследование этой задачи и является целью данной работы.

2. Теория

Моделирование многоканального оптического управления состояниями проводимости ЭДП можно провести на основе бистабильной $p-n-p-n$-структуры с оптическими окнами управления. Такое упрощение основано на предложенном ранее (см., например, [5]) методе представления мультистабильной ЭДП системой виртуальных (вымышленных) бистабильных элементов.

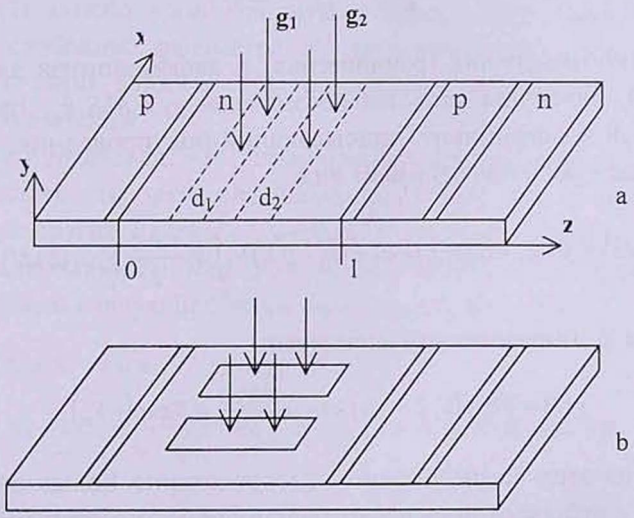

Рис.1. Топология оптических окон на поверхности второй базы полупроводниковой структуры: а) физико-геометрически неэквивалентная последовательная топология; б) эквивалентная (параллельная) топология.

Для конкретности, рассмотрим представленные на рис.1 модель и

способ освещения со второй квазинейтральной базы. Такая модель принята по нескольким соображениям: во-первых, она реализуема по планарной интегральной биполярной технологии, притом в удобной форме для выполнения оптопарных матриц; во-вторых, положения оптических окон в квазинейтральных базах можно выбрать стойкими и с фиксированными размерами; в-третьих, обеспечивается однородность поглощения фотонов по оси OY, и, наконец, полевые эффекты в $p-n$-переходах не влияют на спектр поглощения.

Представленная на рис.1а модель обеспечивает однородность процессов по оси OX, но нуждается в удовлетворении требования коммутативности. В отличие от этого случая, в модели на рис.1б обеспечена коммутативность. Однако могут быть побочные эффекты, связанные с появлением неоднородного распределения плотности тока.

Пусть на i-ое окно падает однородный поток фотонов с поверхностной плотностью интенсивности $\hat{g}_i(z)$:

$$\hat{g}_i(z)=\begin{cases}\hat{g}_i; z\in\left(z_1^i, z_2^i\right),\\ 0; z\notin\left(z_1^i, z_2^i\right),\end{cases} \tag{1}$$

где z_1^i и z_2^i – координаты начала и конца i-ого оптического окна по направлению OZ. Тогда из уравнения непрерывности во второй базе в диффузионном приближении получим:

$$\frac{d^2y}{dz^2}=\frac{y-\bar{y}}{L^2}-\sum_i g_i\,, \tag{2}$$

где $y(\bar{y})$ и L – концентрация (равновесная) и диффузионная длина неосновных носителей. Здесь для удобства обозначено $g_i\equiv ALS_i\hat{g}_i$, где A – некоторый постоянный коэффициент, описывающий полупроводник, S_i – площадь i-ого окна. Общее решение (2) имеет вид

$$y(z)=\bar{y}+c_1\exp(z/L)+c_2\exp(-z/L)+\int_o^z \operatorname{ch}\frac{z-\xi}{L}\sum_i g_i(\xi)d\xi\,, \tag{3}$$

где постоянные c_i определяются условиями

$$y(0)=\bar{y}\exp(V_k),\qquad y(w)-a\frac{dy(w)}{dz}=\bar{y}\exp(-V_k). \tag{4}$$

Первое из этих соотношений – распределение Больцмана у эмиттерного перехода, а второе отличается от больцмановского вторым членом в левой части и учитывает влияние токопрохождения на распределение носителей у границ коллекторного перехода. Такое отклонение от распределения Больцмана носит не только количественный, но и качественный характер [5]: при данном значении V_k обеспечивается возможность двух различных токовых состояний. Например, при $V_k=0$ имеем $y_1=\bar{y}$ и

$y_2 = \bar{y} + ayd(w)/dz$. Определяя c_1 и c_2 из (3) и (4) и подставляя в уравнение тока через переходы, в диффузионном приближении находим следующие выражения для плотностей тока через первый (эмиттерный) и второй (коллекторный) переходы:

$$J_k = J_k^T + \sum_i \alpha_{ki} g_i , \tag{5}$$

где

$$\alpha_{ki} = \frac{2eD_k}{L_k \operatorname{sh} \eta_k} g_{ki} \left[\operatorname{sh} \frac{w_k - \bar{z}_i}{L_k} \operatorname{sh} \frac{d_i}{2L_k} \right], \quad 2\bar{z}_i = z_1^i + z_2^i . \tag{6}$$

Здесь через J_k^T обозначены значения для плотностей тока соответствующих переходов, когда излучение отсутствует (темновая ВАХ), а для сопряжения (сшивания) решений в различных областях, в точках z_1^i и z_2^i использовались условия непрерывности концентраций и плотностей тока неосновных носителей. В данном приближении из (6) следуют соотношения

$$\frac{\alpha_{k1}}{S_1} = \frac{\alpha_{k2}}{S_2}, \qquad \alpha_{11} = \alpha_{21} = \text{const}, \tag{7}$$

которые выбором S_1 и S_2 (т.е. d_1 и d_2)) при заданных g_{k1}, g_{k2}, $\bar{z}_1$ и $\bar{z}_2$ можно удовлетворить, тем самым обеспечив идентичность влияния двух каналов управления, т.е. коммутативность входов.

Условия (7) можно удовлетворить в более общих случаях, так как имеются четыре свободных параметра X_i^k (расположения и размеры окон). Здесь рассмотрим лишь влияние этих оптических воздействий на свойства ВАХ и электропроводности.

Необходимо убедиться, что установленная коммутативность воздействия двух оптических информаций, вводимых в систему со второй базы, действует во всех других частях структуры и во всех областях мультистабильной ВАХ. Для конкретности рассмотрим биполярную шестислойную структуру, задаваемую следующей теоретической моделью [5]:

$$\begin{aligned} &\beta_2^* \equiv \beta_2 + \beta_3 - 1 > 0, \qquad \beta_4 + \beta_5 < 1 < \beta_4^{ef} + \beta_5, \\ &\beta_4^{ef} = \beta_4 + \Delta\beta_4 = \frac{\beta_3 \beta_4 \beta_2^* i_3}{i_2 - \beta_5^2 i_1 - \beta_3^2 i_3} + \beta_4, \quad \delta_1 \neq 0; \quad \delta_3 = \delta_5 = 0. \end{aligned} \tag{8}$$

Здесь β_k – коэффициент переноса неосновных носителей по k-ой базе, i_k – плотность тока насыщения k-ого $p-n$-перехода, δ_k – коэффициент рекомбинации в k-ом эмиттерном переходе в единицах i_k. Такая модель физически возможна и технологически реализуема.

Параметрическая ВАХ и состояния электропроводности такой структуры задаются системой уравнений для плотностей тока через переходы:

$$\begin{cases} j = i_1(\exp(V_1)-1)+i_1\delta_1\exp(V_1/2)+i_1\beta_2(1-\exp(-V_2))-j_1^y, \\ j = i_1\beta_2(\exp(V_1)-1)+i_3\beta_3(\exp(V_3)-1)+i_2(1-\exp(-V_2))+j_2^y, \\ j = i_3(\exp(V_3)-1)+i_3\beta_3(1-\exp(-V_2))+i_3\beta_4(1-\exp(-V_4)), \\ j = i_3\beta_4(\exp(V_3)-1)+i_5\beta_5(\exp(V_5)-1)+i_4(1-\exp(-V_4)), \\ j = i_5(\exp(V_5)-1)+i_5\beta_5(1-\exp(-V_4)), \end{cases} \tag{9}$$

где

$$j_k^y = \alpha_{k1}g_1 + \alpha_{k2}g_2. \tag{10}$$

Система уравнений (9) при фиксированном значении полного напряжения на структуре $V = \sum_{k=1}^{5} V_k$ допускает до пяти различных значений плотности тока J, а также описывает три состояния электропроводности: низкое, среднее и высокое. Каждое из этих состояний можно получить из системы уравнений (9) определенной аппроксимацией, т.е. представлением при помощи двух "виртуальных" тиристоров.

В низкопроводящем состоянии эти тиристоры описываются, соответственно, системами

$$\begin{cases} j = i_1x_1 + i_1\delta\sqrt{x_1} + j_1^y, \\ -\beta_2^* j = -\beta_2 i_1\delta\sqrt{x_1} + \varphi_2 - (j_2^y + \beta_2 j_1^y), \\ j = i_3x_3, \end{cases} \quad \begin{cases} j = i_3x_3, \\ -\beta_4^* j = \varphi_4, \\ j = i_3x_3. \end{cases} \tag{11}$$

В силу условий (8) "первый" из этих тиристоров обладает бистабильной ВАХ, а "второй" всегда заперт. В состоянии со средней проводимостью имеем:

$$\begin{gathered} j = i_1x_1 + i_1\delta_1\sqrt{x_1} + \beta_2 i_1x_2 - j_1^y, \\ -\beta_2^* j = -\beta_1 i_1\delta\sqrt{x_1} + i^* x_2 - j_1^y(\beta_0+\beta_2), \\ j = i_3x_3 + \beta_3x_3x_2, \\ j = \hat{i}_1x_1 + \hat{i}_1\hat{\delta}\sqrt{x_1} + \hat{j}_3^y, \\ -\hat{\beta}_y j = \varphi_4 - \hat{\beta}_2\hat{i}\hat{\delta}\sqrt{x_1} - \hat{j}_4^y. \end{gathered} \tag{12}$$

В отличие от (11), в случае (12) "первый" тиристор, оставаясь бистабильным, находится в открытом режиме, а "второй" тиристор становится уже бистабильным, благодаря появлению в одном из эмиттерных переходов процесса как бы интенсивной рекомбинации с эффективным коэффициентом

$$\hat{\delta} = \frac{(1+\beta_2^2 i)}{i^*}\delta_1, \quad \hat{i}_1 = \frac{i^* i_2}{i^* + \beta_2\beta_2^* i_2} \tag{13}$$

и с повышенным значением коэффициента переноса по четвертой базе

$$\hat{\beta}_2 = \frac{\beta_3\beta_4 i_3}{i^*}\left(1 - \frac{\beta_2(1-\beta_3)i_k}{i_2 - \beta_3^2 i_3}\right)\beta_2,\ \hat{\beta}_4 = \beta_4 + \frac{\beta_3\beta_4 i_3}{i^*}\beta_2^*,\ \beta_0 \equiv \frac{\alpha_{12}}{\alpha_{11}},$$

$$i^* = i_2 - \beta_2^2 i_1 - \beta_3^2 i_3. \qquad (14)$$

Здесь важно, что во "втором" тиристоре тоже "появляется" управляющее воздействие с величинами

$$\hat{j}_3^y = \left[\frac{i^* + \beta_2^2 i_1}{i^* + \beta_2\beta^* i_1} + \frac{\beta_0\beta_2 i_1}{i^* + \beta_2\beta_1^* i_1}\right]\cdot j_1^y;\quad \hat{j}_4^y = (\beta_0 + \beta_2)\frac{\beta_3\beta_4 i_3}{i^*}\cdot j_1^y \qquad (15)$$

для соответствующих переходов и с сохранением свойства коммутативности входов.

Аналогично может быть составлена модель виртуальных тиристоров в высокопроводящем состоянии, когда оба тиристора находятся в открытом состоянии. Такое состояние для "второго" тиристора стало возможным благодаря условию (14). Напомним, что условия (13), (14), и (15) являются результатом действия в структуре эффекта плазменно-полевого взаимодействия, влияние которого сказывается значительно и на качественном уровне, благодаря асимметрии, обусловленной условиями (8).

3. Обсуждение

Семейство ВАХ в зависимости от значения суммарной интенсивности входных оптических сигналов качественно показано на рис.2. Кривая 1 соответствует "темновой" ВАХ, а кривые, заключенные между 1 и 2, представляют низкопроводящее состояние, описываемое системой уравнений (11).

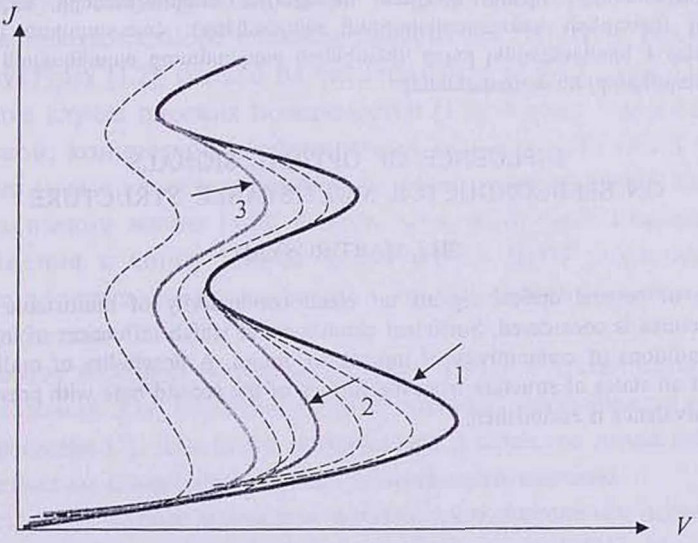

Рис.2. Семейство вольт-амперных характеристик структуры в зависимости от суммарной интенсивности входных оптических пучков.

Видно, что управляющие сигналы существенно не влияют на вторую подсистему. Это влияние значительно для кривых, заключенных между кривыми 2 и 3. Для ВАХ после кривой 3 влияние управляющего сигнала сказывается во всех точках ВАХ.

Таким образом, входные оптические информации коммутативным образом суммарно влияют на электропроводность и ВАХ мультистабильной биполярной структуры, причем явление управления носит пороговый характер. Полученная здесь модель управляющих токов может быть использована для упорядочения выходных токов и напряжения структуры по многоуровневым входным сигналам, что представляет определенный интерес для оптоэлектронных дискретных информационных технологий.

В заключение выражаю благодарность проф. Г.С.Караяну и А.А.Макаряну за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Г.С.Караян**. Микроэлектроника, **19**, 296 (1990).
2. **Ж.И.Алферов, Л.Е. Воробьев** и др. УФН, **4**, 459 (1999).
3. **Г.С.Караян, А.А. Макарян**. Ученые записки ЕГУ, №3, 65 (1984).
4. **И.В.Варламов, В.В. Осипов**. ФТП, **3**, 950 (1969).
5. **Г.С.Караян**. ФТП, **19**, 1334 (1985).

ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ԱԶԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴՉԱՅԻՆ ԲԱԶՄԱՎԻՃԱԿ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔԻ ՎՐԱ

Շ.Ժ. ՄԱՐՏԻՐՈՍՅԱՆ

Ուսումնասիրված է մի քանի օպտիկական ազդանշանների ազդեցությունը բազմավիճակ երկբևեռ կիսահաղորդչային սարքերի էլեկտրահաղորդականության վրա: Գտնված են այն բավարար պայմանները, որոնց դեպքում մուտքային ազդանշանների ազդեցությունները համարժեք են (մուտքերի կոմուտատիվության պայմաններ): Հաստատված է, որ երկրորդ բազայից կարելի է իրականացնել բոլոր վիճակների բազմամուտք օպտիկական կառավարում՝ մուտքերի համարժեքության պահպանմամբ:

INFLUENCE OF OPTICAL SIGNALS ON SEMICONDUCTOR MULTISTABLE STRUCTURE

SH.J. MARTIROSYAN

Influence of several optical signals on electroconductivity of multistable bipolar semiconductor structures is considered. Sufficient conditions, at which influences of input signals are equivalent (conditions of commutivity of inputs) are found. A possibility of multi-input optical management of all states of structure from the surface of the second base with preservation of the property of equivalence is established.