

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ В СТРУКТУРЕ Si-SiO₂-VO₂

Н. А. Кулдин, А. А. Величко

Петрозаводский государственный университет, г. Петрозаводск, Россия
kuldin@psu.karelia.ru

Разработка новых полупроводниковых элементов совместимых с кремниевой технологией, но основанных на других физических эффектах привлекает большое внимание исследователей. В данной работе описывается Si-SiO₂-VO₂ структура (рис.1.) с управляемой динамикой переключения, а также приводятся результаты моделирования ее свойств. Эффект переключения обусловлен переходом металл-изолятор (ПМИ) в двуокиси ванадия. Механизм переключения обычно трактуется в рамках модели критической температуры, однако, как было показано нами, на температуру ПМИ можно влиять электрическим полем, а также инъекцией заряда [1].

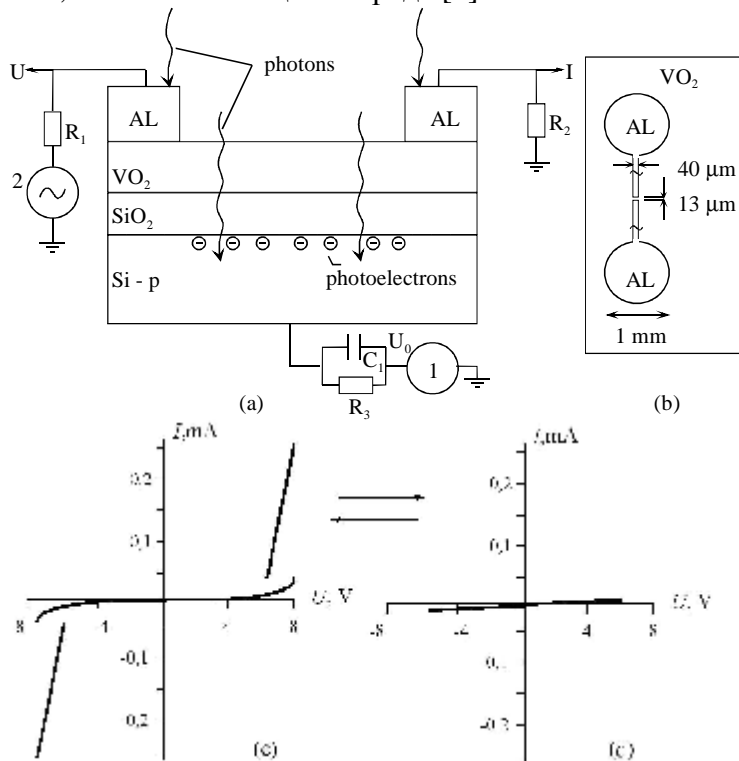


Рис.1. Схема включения структуры (а), 1 – постоянный источник, 2 – генератор ($R_1 = 100 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 10 \text{ }\Omega$, $R_3 = 560 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 0.022 \text{ }\mu\text{F}$; вид контактов (б), динамическая вольт-амперная характеристика (ВАХ) структуры с (с) и без (d) переключения.

Пленка диоксида ванадия (~3000 Å) осаждалась на Si-SiO₂ (Si-p-типа, $r = 1 \text{ }\Omega\cdot\text{cm}$; SiO₂ ~1000 Å) подложку методом реактивного магнетронного распыления. Сверху наносились алюминиевые контакты (рис.1.б). ВАХ структуры исследовалась на переменном сигнале в режиме генератора тока (большое сопротивление R_1). Исследуемая структура характеризуется ВАХ переключательного типа (рис.1.с). При наблюдении динамической ВАХ на низкочастотном сигнале (~100 Hz), освещение структуры и (или) смещение Si-подложки (по крайней мере, в диапазоне U_0 от -30 до 30 V) не влияло на вид ВАХ. Однако при переходе в более высокочастотную область можно было обратимо переводить структуру в состояние без переключения при помощи подачи соответствующего напряжения смещения на подложку. Так на частоте 6 kHz при $U_0 < -12.2 \text{ V}$ наблюдался переход к динамической ВАХ показанной на рис.1 d. В этом случае переключение отсутствует. При положительном смещении подложки вырождение переключения наблюдалось при $U_0 > 4.6 \text{ V}$.

Далее было обнаружено влияние освещения на динамику переключения. При $U_0 \geq 0$ освещение не влияло на работу переключателя. Однако при отрицательном смещении подложки уже слабое освещение приводило к исчезновению переключения на динамической ВАХ. Так на частоте 6 kHz при $U_0 = -8 \text{ V}$ и освещенности $5 \cdot 10^{-4} \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ переключение исчезало, и динамическая ВАХ имела вид, показанный на рис.1.d.

Таким образом, мы могли управлять динамикой переключения структуры изменяя освещение (фотоемкостный эффект) или напряжение смещения U_0 .

Эквивалентная схема структуры представлена на рисунке 2.a.b

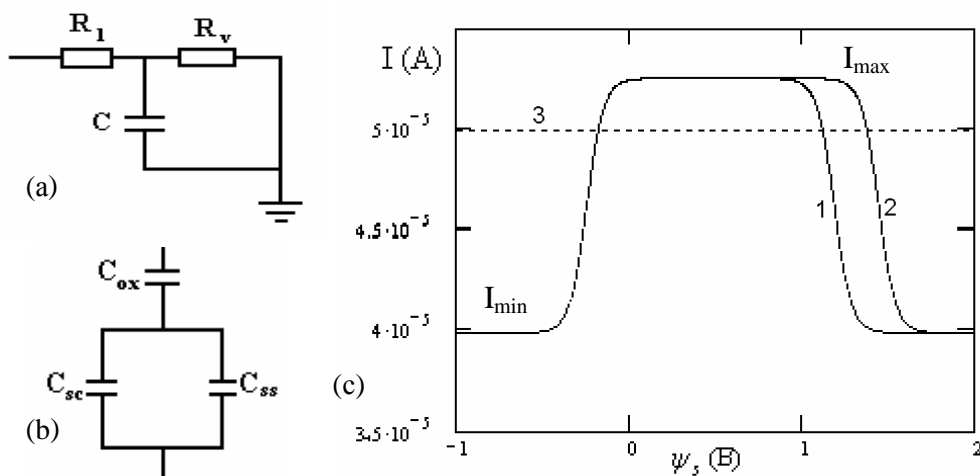


Рис.2. Эквивалентная схема (а), R_1 – ограничительное сопротивление, R_v – сопротивление пленки диоксида ванадия, C – емкость МДП-структуры (б), состоящая из трех емкостей: C_{ox} –подзатворного диэлектрика SiO_2 , C_{sc} – области пространственного заряда (ОПЗ), C_{ss} – поверхностных состояний (ПС); зависимость I от ψ_s (с).

При подаче переменного напряжения U , через резистор R_v протекает ток который при превышении некоторого амплитудного значения I_k вызывает эффект переключения, обусловленный разогревом VO_2 до температуры ПМИ. Было промоделировано амплитудное значение тока в зависимости от поверхностного потенциала, определяемого напряжением смещения U_0 , и сравнение его с I_k (кривая 3 рис.2.с). В модели учитывалась зависимость C_{sc} и C_{ss} от частоты сигнала.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_p + C_B + \frac{C_n}{1 + w^2 t_n^2} + \frac{C_{ss}}{1 + w^2 t_{ss}^2}} \quad (1)$$

где t_{ss} – время перезарядки ПС, τ_n – время жизни неосновных носителей, C_B – емкость ОПЗ в области обеднения и слабой инверсии, C_p – емкость ОПЗ в обогащении, C_n – емкость ОПЗ в области сильной инверсии.

Для схемы представленной на рис 2.а ток через пленку диоксида ванадия рассчитывается по формуле:

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R_v)^2 + (wCR_1R_v)^2}} \quad (2)$$

Выводы:

1. При увеличении частоты сигнала подаваемого на структуру происходит уменьшение I_{max} (I_{max} , I_{min} – максимальное и минимальное значение тока при варьировании ψ_s рис.1.с), т. е. $I_{max} < I_k$. В результате чего переключатель не работает в данном диапазоне частот. Однако если уменьшить геометрические размеры переключателя, то I_{max} достигает I_k и переключение становится возможным. При частотах порядка 1 – 10 kHz переключатель имеет две рабочие точки переключения (рис.2.с, кривая 1), при положительном и отрицательном значении поверхностного потенциала. Однако при переходе в более высокочастотную область, рабочая точка ($\psi_s > 0$) сдвигается в область больших значений ψ_s , которая реально недостижима (рис.2.с, кривая 2). В результате переключатель имеет одну рабочую точку.

2. Влиять на параметры переключателя можно при помощи варьирования длины и ширины алюминиевых контактов, а так же расстояния между ними.

Критический ток $I_k = j_k h d$ (где j_k – критическая плотность тока при ПМИ, h – ширина контактов, d – толщина пленки). Критическое напряжение $U_k = r j_k l$ (где ρ – удельное сопротивление пленки VO_2 , l – расстояние между контактами).

Подбирая данные параметры можно выводить структуру в режим управляемого переключения в очень широком диапазоне частот, что делает ее перспективным элементом в микроэлектронике.

Работа выполнена при поддержке гранта Министерства Образования РФ и Американского Фонда Гражданских Исследований и Развития (CRDF) № PZ-013-02.

[1] А.А. Величко, Н.А. Кулдин, Г.Б. Стефанович, А. Л. Пергамент //ПЖТФ, т.29, в.12, с.49-53. (2003).