

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ МНОП-СТРУКТУР В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

А. Ф. Плотников, Р. Г. Сагитов, З. Я. Садыгов, В. Н. Селезнев

УДК 621.382

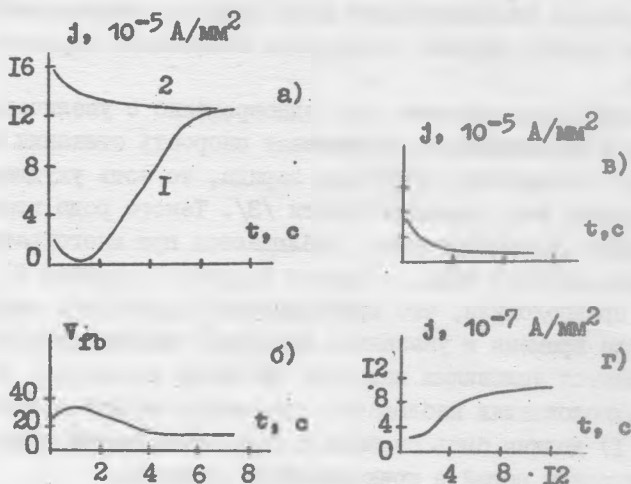
Обнаружено увеличение проводимости МНОП-структур под действием сильного электрического поля ($E > 8 \cdot 10^6$ В/см) при комнатной температуре. Указанный рост проводимости объясняется накоплением скомпенсированного заряда захваченных электронов и дырок в объеме нитрида кремния.

В работе изучалась нестационарная проводимость многослойных структур металл - нитрид кремния (Si_3N_4) - туннельно тонкий слой окиси кремния (SiO_2) - полупроводник (Si) (МНОП-структур). При больших напряженностях электрического поля процесс релаксации тока, связанный с установлением стационарной проводимости МНОП-структур, имеет сложный характер. Так, в работе /1/ за участком, характеризующимся спадом начального тока со временем, на структурах с алюминиевым электродом при высоких электрических полях и повышенных температурах наблюдался аномальный рост тока. В наших экспериментах аномальная нестационарная проводимость наблюдалась при комнатной температуре в диапазоне напряженности электрических полей $7 \cdot 10^6 - 10^7$ В/см.

Исследовались МНОП-структуры с туннельно тонким слоем SiO_2 толщиной 20 \AA и слоем Si_3N_4 толщиной $800 - 900 \text{ \AA}$. Нитрид кремния получался высокотемпературным пиролизом при взаимодействии тетрахлорида кремния и аммиака. МНОП-емкости изготавливались термическим напылением алюминиевых или золотых электродов на структуру $Si - SiO_2 - Si_3N_4$. Площадь металлического электрода составляла 1 мм^2 .

На рис. 1а (кривая I) представлена зависимость протекающего через структуру тока от времени. При измерении тока к алюми-

вому электроду структуры прикладывалось постоянное напряжение V , положительной полярности относительно кремниевой подложки. На кривой I имеется участок с ростом тока со временем, затем ток достигает значения j_H , слабо меняющегося со временем. Это значение тока более чем на два порядка превышает его минимальную величину j_{\min} . Кривая 2 на рис. 1а показывает изменение тока со временем при повторном приложении к структуре такого же напряжения. Ток монотонно спадает до уровня j_H .



Р и с. 1. Зависимость от времени плотности тока j и напряжения плоских зон V_{fb} : а) + Al, $V = 73 \text{ В}$; 1 - при первоначальном приложении напряжения ($j_{\min} = 10^{-6} \text{ A/mm}^2$), 2 - при повторном приложении напряжения; б) + Al, $V = 73 \text{ В}$; в) + Au, $V = 60 \text{ В}$; г) Si - SiO₂ - Si₃N₄ - SiO₂ - Au, + Au, $V = 60 \text{ В}$

Если напряжение выключить на линейном участке роста тока, то при повторном приложении такого же напряжения ток сначала спадает до величины, наблюдавшейся в момент выключения напряжения, а затем растет до значения j_H . Таким образом, увеличение проводимости (рис. 1а, кривая I) носит в наших условиях необратимый характер. Это подтверждается измерениями стационарных вольт-амперных характеристик (ВАХ) структур. На рис. 2 приведены ВАХ, построенные в координатах Пула - Френкеля. Стационарная проводимость структуры возрастает, если она

предварительно подвергалась воздействию сильного электрического поля и наблюдалась аномальная релаксация тока (кривая 2). Линейный характер ВАХ в координатах Пула - Френкеля позволяет заключить, что в области электрических полей $4 \cdot 10^6 + 8 \cdot 10^6$ В/см механизм переноса заряда через диэлектрик определяется термополевой ионизацией ловушек в объеме Si_3N_4 /2/. Однако при напряженности электрического поля $E > 8 \cdot 10^6$ В/см наблюдается отклонение от линейной зависимости (рис. 2, кривая 2). Соответственно, эта же напряженность электрического поля является минимальной, при которой на данном образце наблюдался аномальный характер проводимости.

Воздействие сильного поля одновременно с увеличением стационарной проводимости увеличивает скорость стекания накапливаемого при поляризации структуры заряда, то есть ухудшаются свойства структуры как элемента памяти /3/. Такого рода изменения, называемые деградиационными, наблюдаются при многократном переключении структур (рис. 2, кривая 3, рис. 3, кривая 3).

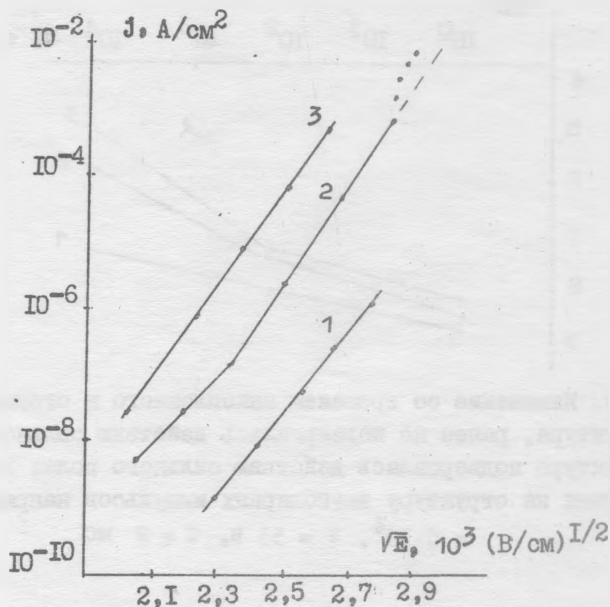
Мы предположили, что проводимость структуры в исследуемом интервале времени и указанном диапазоне электрического поля определяется условиями инжекции на обоих контактах. В указанных предположениях наблюдаемые изменения величины тока (рис. 1а, кривая I) должны быть связаны с соответствующими изменениями электрических полей в приконтактных областях.

Действительно, на рис. 1б показано изменение напряжения плоских зон V_{fb} со временем, наблюдавшееся при аномальной релаксации проводимости (рис. 1а, кривая I). Временная зависимость электрического поля на контакте полупроводник - диэлектрик, рассчитанная по формуле

$$E_k(t) = [V - V_{fb}(t)]/d_0, \quad (I)$$

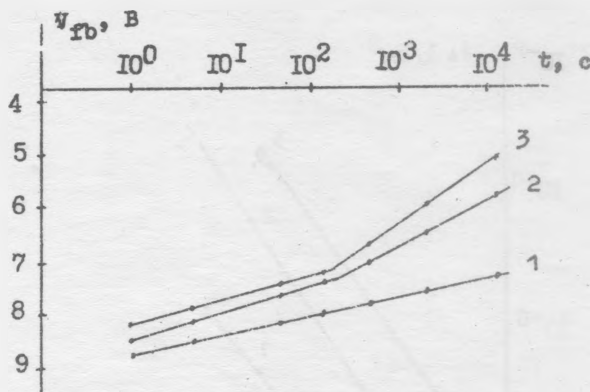
коррелирует с наблюдаемым изменением тока через структуру. Для уточнения роли второго контакта сравнивалось поведение структур с алюминиевыми и золотыми электродами. На структуре с золотыми электродами заметного роста тока не наблюдалось (рис. 1в). При одинаковой напряженности электрического поля в структурах с золотыми электродами наблюдается большая величина тока, чем для структур с алюминиевыми электродами.

Отметим, что для контакта Au - Si_3N_4 барьер для туннелиро-



Р и с. 2. Стационарные вольт-амперные характеристики при положительном напряжении на металле: 1 - структура ранее не подвергалась действию сильного электрического поля ($E < 7 \cdot 10^6$ В/см); 2 - структура подвергалась действию сильного электрического поля (см. рис. 1а); 3 - структура подвергалась воздействию дипольных импульсов напряжения, число циклов $N = 5 \cdot 10^4$, амплитуда $V = 55$ В, длительность $\tau = 2$ мс

вания дырок составляет 1,05 эВ, в то время как для структуры с алюминиевым электродом высота барьера равна 1,95 эВ /4/. Мы изменили условия для инжекции дырок из золотого электрода. С этой целью высокочастотным распылением кварца в низкотемпературной плазме аргона на диэлектрический слой Si_3N_4 осаждался слой SiO_2 , толщиной 50 \AA , затем наносился золотой электрод. Из-за малой высоты барьера на границе $Si_3N_4 - SiO_2$ (в электрическом поле 10^7 В/см толщина этого барьера $\approx 10 \text{ \AA}$) электронная компонента тока не должна существенно изменяться. В то же время вероятность туннелирования дырок на контакте $Au - SiO_2$ значительно падает.



Р и с. 3. Изменение со временем накопленного в структуре заряда: 1 - структура, ранее не подвергалась действию сильного поля; 2 - структура подвергалась действию сильного поля; 3 - после воздействия на структуру двуполярных импульсов напряжения: $M = 5 \cdot 10^4$, $V = 55$ В, $\tau = 2$ мс

На структуре с дополнительным слоем SiO_2 нами наблюдалась аномальная релаксация проводимости (рис. 1г), что подтверждает влияние второго контакта на характер релаксации тока.

Наблюдаемые нами результаты объясняются на основе следующей модели:

В области высоких электрических полей ($E > 8 \cdot 10^6$ В/см) и в исследованном диапазоне времен проводимость Si_3N_4 определяется туннельным эффектом на контактах, то есть зависит от величины электрического поля в приконтактных областях. При заданной величине внешнего напряжения изменение напряженности электрического поля в приконтактных областях связано с изменением заряда ловушек в диэлектрике.

Рассмотрим приконтактную область полупроводник - диэлектрик.

Изменение со временем электрического поля в этой области, определяющее изменение тока контакта, имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial t} E_k(t) = - (q/\epsilon_s d_0) \int_0^{d_0} (d_0 - x) \left[\frac{\partial}{\partial t} n_p(x,t) - \frac{\partial}{\partial t} n_n(x,t) \right] dx,$$

где x - расстояние от границы раздела полупроводник-диэлектрик, q - заряд электрона, ϵ_s - диэлектрическая постоянная диэлектрика; $\partial n_p/\partial t$ $\partial n_n/\partial t$ - скорость изменения со временем плотности захваченных электронов и дырок, соответственно. В начальный момент после приложения высокого электрического поля скорость накопления электронов у этого контакта существенно превышает скорость накопления дырок и электрическое поле на контакте уменьшается. Начиная с некоторого момента времени скорость накопления дырок, инжектированных противоположным контактом, превзойдет скорость накопления электронов, E_n возрастает до некоторого стационарного значения, соответствующего стационарному заполнению ловушек, что и объясняет наблюдаемый аномальный характер релаксации тока.

Для структур с золотым электродом (без дополнительного слоя SiO_2) из-за большой величины дырочного тока равновесное распределение захваченных дырок достигается достаточно быстро, за времена, сравнимые со временем накопления электронов, и роста тока в наших экспериментах не наблюдается.

Захват заряда в объеме нитрида кремния и его частичная компенсация может объяснить наблюдаемые увеличения скорости стекания накопленного заряда и увеличение стационарной проводимости структур. Действительно, с ростом степени заполнения ловушек возрастает концентрация свободных носителей в зонах диэлектрика, а следовательно, увеличивается проводимость структуры.

Поступила в редакцию
19 декабря 1979 г.

Л и т е р а т у р а

1. V. A. Gritsenko, E. E. Meerson, S. P. Sinitza, Phys. Stat. Sol. (a), **48**, 31 (1978).
2. S. M. Sze, J. Appl. Phys., **33**, 2951 (1967).
3. Чжан, ТИЭР, **64**, № 7, 20 (1976).
4. С. М. Зи, "Физика полупроводниковых приборов", изд. "Энергия", М., 1973 г.