

- [1] Сарпкая Т. // Современное машиностроение. Сер. А. 1989. С. 1-60.
- [2] Белоцерковский С.М., Ништ М.И. Отрывное и безотрывное тонких крыльев идеальной жидкостью. М.: Наука, 1978. С. 352.
- [3] Leonard A. // J. Comput. Phys. 1980. Vol. 7. P. 289-335.
- [4] Джонсон // Ракетная техника и космонавтика. 1980. № 5. С. 23.
- [5] Saffman P.G., Meiron D.I. // Phys. Fluids. Vol. 29. P. 2373-2375.
- [6] Новиков Е.А. // ЖЭТФ. 1983. Вып. 3. С. 975-981.
- [7] Басин М.А. // Гидродинамика судна. Материалы по обмену опытом. Л.: Судостроение, 1990. С. 40-62.
- [8] Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1977.
- [9] Сретенский Л.Н. Теория ньютоновского потенциала. М.: Гостехиздат, 1946. С. 318.
- [10] Муратов Р.В. Потенциалы эллипсоида. М.: Атомиздат, 1976. С. 144.
- [11] Beale J.T., Maida A. // Math. Comp. 1982. Vol. 39. P. 1-27.
- [12] Beale J.T., Majda A. // Math. Comp. 1982. Vol. 39. P. 29-52.

04;06;12  
© 1994 г.

Журнал технической физики, т. 64, в. 11, 1994

## ИЗМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК GaAs ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПЛАЗМОЙ SF<sub>4</sub>

К.С.Журавлев, В.А.Колосанов, В.Г.Плюгин, Т.С.Шамирзаев

Институт физики полупроводников СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия  
(Поступило в Редакцию 23 февраля 1994 г.)

Травление в плазме, содержащей фтор, широко используется для селективного удаления окиси кремния и нитрида кремния с поверхности полупроводниковых структур  $A_3B_5$  при изготовлении различных приборов. Для полного удаления диэлектрических пленок структуры обычно немного перетравливают, но при этом плазма некоторое время воздействует на полупроводник и в той или иной степени повреждает его [1,2].

Результаты исследований влияния обработки в плазме SF<sub>4</sub> на свойства поверхности пленок GaAs, представленные в работах [3,4], позволяли надеяться, что кратковременное ( $\leq 10$  с) воздействие плазмы на поверхность приборных структур для транзисторов с двумерным электронным газом (НЕМТ) не будет приводить к значительному изменению их параметров. Однако представленные в данной работе исследования показали, что даже кратковременное воздействие плазмы SF<sub>4</sub> на поверхность НЕМТ структур приводит к полной деградации свойств транзисторов. Для получения информации о причинах такой деградации в данной работе были изучены электрические и люминесцентные свойства структур, используемых для изготовления НЕМТ транзисторов, транзисторов с барьером Шоттки (ПТШ) и субмикронных слоев

$n^+$ -GaAs, после обработки в плазме  $\text{CF}_4$  в течение различного времени, а также после отжига в инертной атмосфере.

Исследуемые НЕМТ структуры, полученные методом МЛЭ, содержали следующие слои:  $n^+$ -GaAs (500 Å)-GaAs (150 Å)- $n$ -AlGaAs (350 Å)-AlGaAs (28 Å)- $n$ -GaAs (5000 Å)-GaAs (полуизолирующий). Эпитаксиальные структуры для ПТШ содержали слои:  $n^+$ -GaAs (1500 Å)- $n$ -GaAs (2500 Å) на полуизолирующей подложке. Исследовались также структуры  $n^+$ -GaAs (1500 Å)-GaAs (полуизолирующий). Концентрация электронов в слоях  $n^+$ -GaAs равнялась  $n = 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , в слое двумерного газа НЕМТ структуры (в пересчете на объемную концентрацию)  $n \leq 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Для измерения электрических характеристик на поверхность структур наносили омические контакты из AuGeNi к слоям  $n$ -типа (с отжигом при 400 °C) и из TiAu — к слоям, обработанным в плазме (с отжигом при 270 °C).

Обработка в плазме проводилась при плотности мощности 0.5 Вт/см<sup>2</sup>, потенциале самосмещения 300 В и давлении 0.07 Тор.

На рис. 1 приведены вольт-амперные характеристики (ВАХ), измеренные между омическими контактами к НЕМТ структурам. Для исходных структур наблюдается линейная зависимость между током и напряжением с характерным сопротивлением порядка 1 Ом. После обработки в плазме  $\text{CF}_4$  при комнатной температуре в течение 10 с проводимость структур уменьшается на 6–8 порядков, что говорит об исчезновении свободных электронов в слое двумерного газа и, следовательно, в слое  $n$ -AlGaAs. Это означает, что обработка поверхности GaAs плазмой  $\text{CF}_4$  сопровождается деградацией электрических свойств на глубине не менее суммарной толщины этих слоев, т.е. порядка 1000 Å. Характеристики такого типа обычно наблюдаются при исследовании изолирующих слоев, получаемых в GaAs бомбардировкой протонами или ионами бора. Используя плазменную обработку для получения изолирующих ПТШ транзисторы областей в  $n$ -GaAs с  $n = 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , мы получили токи утечки более чем на порядок величины меньше, чем при использовании бомбардировки ионами бора. Таким образом, обработку поверхности GaAs в плазме  $\text{CF}_4$  можно использовать для создания локальных изолирующих областей.

Необходимо отметить, что отжиг структур при температурах, обычно используемых при получении омических контактов (до 460 °C), приводит к частичному восстановлению проводимости.

Компенсация донорной примеси при обработке в плазме может быть обусловлена образованием большой концентрации глубоких акцепторов, связанных с точечными дефектами решетки, диффундирующими из области приповерхностных нарушений и/или с диффузией химических элементов, вероятнее всего, фтора [5]. Последние в этом случае могут локализоваться вблизи доноров и пассивировать их, либо выступать в роли компенсирующих акцепторов. Концентрация компенсирующих акцепторов велика и как минимум превышает исходную концентрацию свободных электронов в НЕМТ структуре  $\approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Дополнительную информацию об электрических свойствах обработанных в плазме областей была получена при исследовании ВАХ перехода между исходным  $n$ -слоем GaAs и обработанной в плазме локальной областью этого же слоя. Специально изготовленные образцы

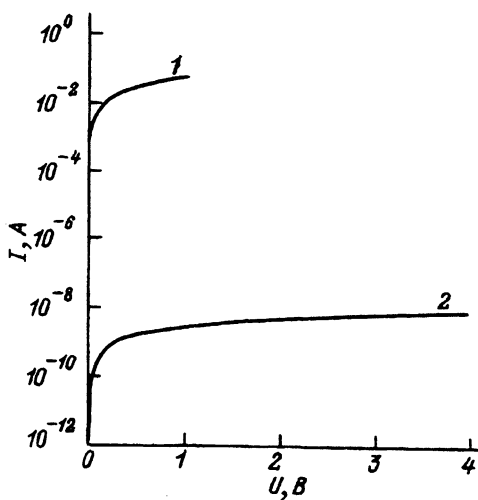


Рис. 1. Зависимость тока от напряжения между омическими контактами в НЕМТ структуре.

1 — исходная, 2 — после обработки в плазме 10 с.

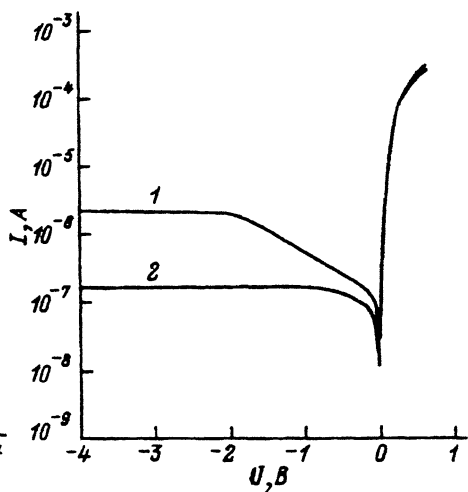


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики перехода между  $n^+$ -GaAs и обработанной в плазме локальной области  $n$ -GaAs с площадью  $2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$ . Время обработки в плазме: 1 — 10, 2 — 100 с.

с такими переходами содержали следующие слои: AuGeNi- $n^+$ -GaAs- $n$ -GaAs — локальная область  $n$ -GaAs, обработанная в плазме, —TiAu. Типичная  $I$ - $V$ -зависимость перехода между исходным  $n$ -GaAs и обработанным в плазме приведена на рис. 2. Из рисунка видно, что такой переход обладает выпрямляющими свойствами и обратная ветвь ВАХ имеет нетипичный вид. При малых величинах смещения обратный ток возрастает экспоненциально, а при увеличении смещения больше некоторого критического значения  $V_k$  ток практически перестает зависеть от приложенного напряжения. Причина экспоненциальной зависимости на начальном участке в настоящее время неясна. Увеличение вре-

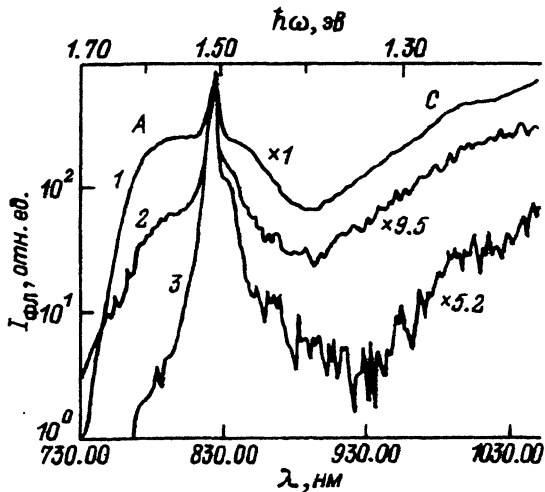


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции (ФЛ) эпитаксиальных структур GaAs, скорректированные на пропускание монохроматора и спектральную чувствительность фотоприемника при 77 К.

Параметр — время обработки в плазме. 1 — исходный спектр, 2 — 30, 3 — 180 с.

мени экспозиции в плазме приводит к уменьшению величины обратного тока и уменьшению величины  $V_k$ . Анализ показывает, что величина  $V_k$  соответствует полному обеднению  $n$ -слоя до подложки и значение  $V_k$  позволяет оценить толщину изолирующего слоя, полученного в результате обработки. При времени экспозиции в плазме 10 с толщина составляет  $\approx 1000 \text{ \AA}$ , а при обработке в течение 100 с —  $\approx 1500 \text{ \AA}$ . Эти величины хорошо совпадают с оценкой глубины проникновения дефектов в НЕМТ структуре. Отметим также, что при смещениях  $V > 15 \text{ В}$  начинает наблюдаться релаксация обратного тока.

На рис. 3 приведены спектры ФЛ слоев  $n^+$ -GaAs, обработанных в  $\text{CF}_4$ , в различное время. В спектрах присутствуют линии, связанные с  $n^+$ -GaAs и линия межзонной ФЛ в нижележащем слое намеренно легированного GaAs. Линия  $A$  соответствует межзонной рекомбинации в  $n^+$ -GaAs, а широкая линия  $C$  — рекомбинации через уровни комплексов, состоящих из атомов легирующей примеси и дефектов решетки. Обработка в плазме приводит к падению интенсивности излучательной рекомбинации в  $n^+$ -GaAs, что может быть обусловлено увеличением темпа безызлучательной рекомбинации из-за нарушения поверхности при бомбардировке ионами плазмообразующего газа. Обращает внимание тот факт, что интенсивность межзонной рекомбинации падает гораздо сильнее, чем интенсивность глубоких полос, что, очевидно, связано с увеличением концентрации комплексов и, следовательно, точечных дефектов решетки в слоях после их обработки в плазме. Последующий отжиг приводит к восстановлению излучательной рекомбинации в слоях. Однако спектральный состав линий, отражающий состав присутствующих в отожженном материале глубоких центров, отличается от исходного и зависит от температуры отжига.

В результате проведенных исследований установлено, что кратковременная (до 10 с) экспозиция  $n$ -GaAs в плазме  $\text{CF}_4$  приводит к компенсации мелких доноров глубокими акцепторами с концентрацией  $N_A \geq 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  и образованию изолирующего слоя толщиной порядка  $1000 \text{ \AA}$ . В этом слое происходят увеличение концентрации точечных дефектов решетки и уменьшение эффективности излучательной рекомбинации. Эти изменения могут быть связаны с бомбардировкой поверхности GaAs ионами плазмы или/и диффузией фтора в GaAs. Отжиг при температурах до  $460^\circ \text{C}$  частично восстанавливает исходную проводимость и эффективность излучательной рекомбинации.

### Список литературы

- [1] Juang C., Hsu J.K., Yen I.S., Shiau S. // J. Appl. Phys. 1992. Vol. 72 (2). P. 4109.
- [2] Pearton S.J., Chakrabarti U.K., Baiocchi F.A. // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 55 (2). P. 1633.
- [3] Pang S.W. // J. Electrochem. Soc. 1986. Vol. 133 (4). P. 784.
- [4] Hara T., Suzuki H., Suga A. et al. // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 62 (10). P. 4109.
- [5] Мадан А. Физика гидрогенизированного аморфного кремния. Вып. 1. М.: Мир, 1987. 310 с.