

06.2;12

Фотоэлектрические свойства планарных структур с двойным барьером Шоттки, обработанных в высоковакуумном СВЧ-разряде

© Н.М. Ушаков, С.А. Терентьев, Р.К. Яфаров

Институт радиотехники и электроники РАН, Саратовское отделение
E-mail: nmu@mail.saratov.ru

Поступило в Редакцию 20 февраля 2002 г.

Экспериментально исследованы состояние поверхности арсенида галлия *n*-типа, подвергнутого сверхвысокочастотному вакуумно-плазменному травлению (СВЧ ВПТ) в различных газовых смесях, и влияние состояния поверхности полупроводника на фотоэлектрические характеристики структур металл–полупроводник–металл с двойным барьером Шоттки (МПМДБШ). Получены зависимости скорости травления поверхности арсенида галлия от процентного состава газовых смесей и температуры подложки. Показано, что режимы СВЧ ВПТ сильно влияют на фотоэлектрические свойства МПМДБШ структур и могут приводить как к росту, так и к спаду их фоточувствительности. Обнаружены оптимальные режимы СВЧ ВПТ, когда скорость травления, качество поверхности полупроводника и фоточувствительность МПМДБШ структур остаются высокими.

Планарные структуры с двойным барьером Шоттки относятся к поверхностно-барьерным структурам с полезной фоточувствительной площадью, образованной межэлектродными промежутками [1,2]. Поэтому состояние открытой поверхности полупроводника, подвергнутой специальной обработке, во многом определяет протекание процессов фотоэлектрического преобразования в таких структурах [3]. Кроме того, большие площади периодических структур металл–полупроводник–металл позволяют повысить обнаружительную способность оптических сигналов, но создают проблемы сравнительно больших токов утечки. Традиционными мерами борьбы с токами утечки являются технологические методы изготовления либо легированных охранных колец на границе металл–полупроводник, либо мезаструктур. Для открытых поверхностно-барьерных периодических МПМ-структур второй путь

более предпочтителен, так как исключает дополнительные технологические операции по легированию поверхности полупроводника.

Одним из перспективных методов воздействия на поверхность полупроводника и создания мезаструктур является метод сухого травления или метод СВЧ вакуумно-плазменного травления (СВЧ ВПТ) поверхности полупроводника [4,5]. Этот метод позволяет проводить процессы обработки поверхности полупроводника с нанесенной металлической структурой на заключительном этапе технологической цепочки изготовления в наиболее мягких режимах и при пониженных давлениях рабочего газа. При этом достигаются анизотропность травления и высокое качество обработанной поверхности. Основным требованием к рабочему газу является возможность генерации в плазме химически активных частиц, образующих при взаимодействии с обрабатываемым материалом летучие химические соединения. Для арсенида галлия (GaAs) этому требованию удовлетворяют только хлорсодержащие газы, которые дают летучие соединения с обоими элементами этого соединения. Так как температура перехода в газовое состояние для GaCl_3 около 200°C , а для As_3Cl_3 — 131°C , то процесс травления необходимо проводить при достаточно высокой температуре подложки. Для большей эффективности процесса травления на изолированный подложкодержатель подавался ускоряющий потенциал U в диапазоне $50\text{--}200\text{ V}$, что значительно увеличивало скорость травления. При травлении в чистом CCl_4 наблюдалось интенсивное осаждение углеродного осадка на подложку. Для предотвращения этого процесса в рабочий газ добавлялся кислород.

На рис. 1, *a* представлены экспериментальные зависимости скорости травления GaAs от процентного содержания кислорода в смеси $\text{CCl}_4 + \text{O}_2$ при давлении $8 \cdot 10^{-2}\text{ Pa}$ и различных ускоряющих напряжениях. Из зависимостей следует, что наиболее эффективное травление наблюдается при добавке кислорода в пределах $20\text{--}40\%$. На скорость травления оказывает существенное влияние температура подложки, особенно до 200°C .

На рис. 1, *b* показаны экспериментальные зависимости скорости травления GaAs от температуры подложки в газе $\text{CCl}_4 + \text{O}_2$ (20%) при давлении 0.1 Pa и различных ускоряющих напряжениях. Как видно из приведенных зависимостей, процесс травления начинается при 130°C , при $U = 50 \div 100\text{ V}$, с увеличением U до 150 V температура начала процесса снижается до 100°C . С ростом температуры до 200°C скорость

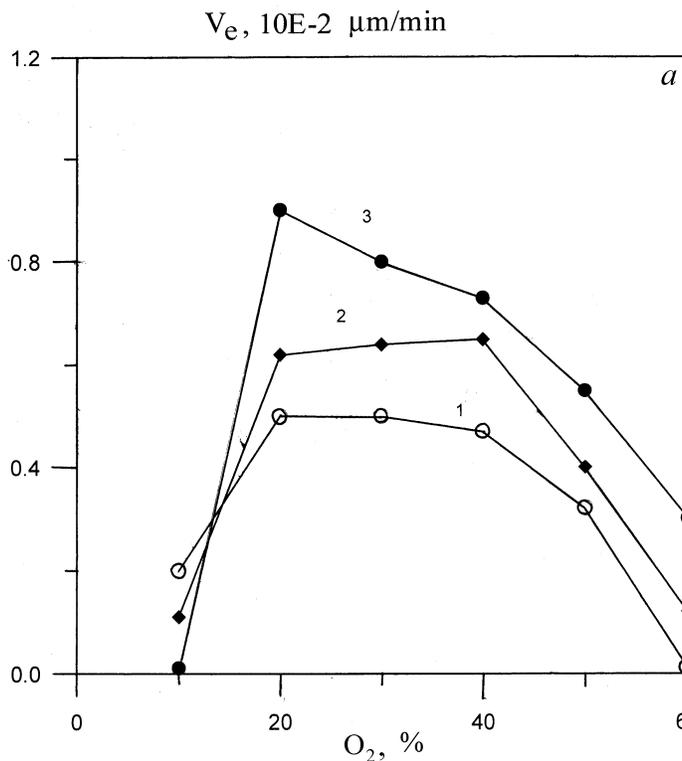


Рис. 1. Зависимости скорости травления $n\text{-GaAs}$: a — от процентного содержания O_2 в смеси $\text{CCl}_4 : \text{O}_2$; b — от температуры подложки для смеси $\text{CCl}_4 : \text{O}_2 = 5 : 1$. Давление в реакторе 0.1 Па. Мощность СВЧ равна 375 Вт. Ускоряющее напряжение: 1 — 70 В; 2 — 100 В; 3 — 150 В.

травления линейно растет с температурой для указанных напряжений смещения. Дальнейшее увеличение температуры практически не изменяет скорость травления. Таким образом, при использовании рабочего газа CCl_4 оптимальными являются смесь $\text{CCl}_4 + \text{O}_2$ и температура подложки 200–220°C. Полученные при использовании данного состава газа в наиболее мягких режимах обработки ($U = 50 \div 100 \text{ В}$) МПМ-структуры имели хорошее качество обработанной поверхности, но

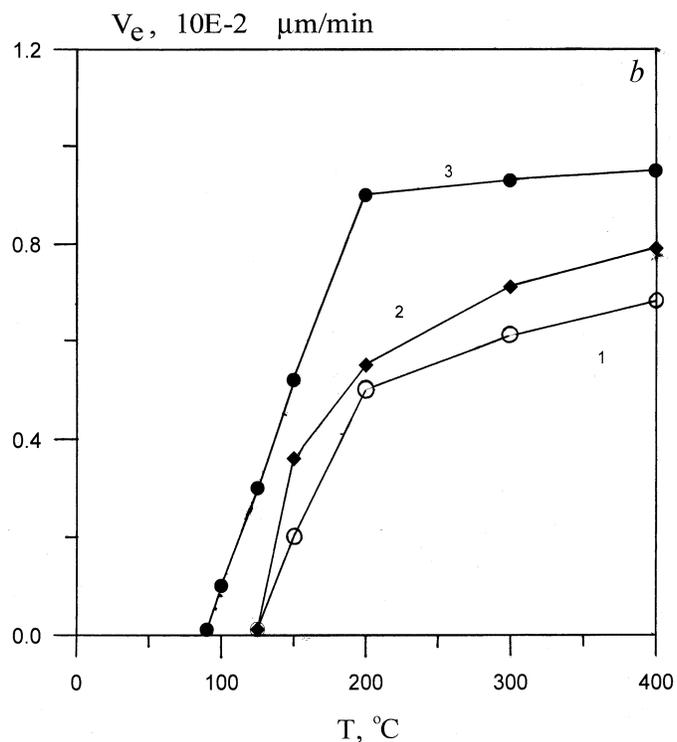


Рис. 1 (продолжение).

высота мезоструктур не превышала $0.1\text{--}0.2 \mu\text{m}$ из-за низкой скорости травления GaAs в этих режимах. Фотоэлектрические измерения обработанных в данном режиме образцов показали возрастание фотосигнала примерно в 2–3 раза по сравнению с аналогичными образцами, не подвергнутыми СВЧ ВПТ.

Для получения мезоструктур с глубиной канавки более $0.5 \mu\text{m}$ необходима более высокая скорость травления, чем при травлении в газе $\text{CCl}_4 + \text{O}_2$. Увеличения скорости травления можно добиться, применяя другую смесь газов: $\text{HCl} : \text{CCl}_4 : \text{O}_2$. При этом добавка HCl увеличивает концентрацию радикалов хлора в плазме, а наличие CCl_4 позволяет эффективно удалять с поверхности материала слой собственного окис-

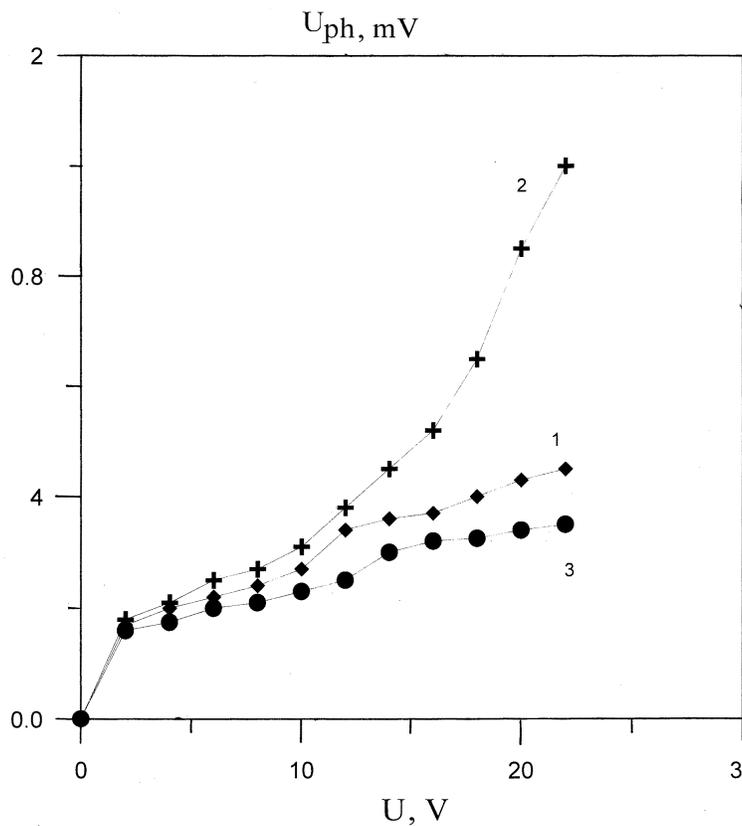


Рис. 2. Фотоотклик МПМ-структуры встречно-штыревого типа на арсениде галлия *n*-типа от напряжения электрического смещения на межэлектродном зазоре для разных значений ускоряющего напряжения реактора СВЧ ВПТ: 1 — 70 В; 2 — 100 В; 3 — 150 В.

ла. Структура и качество поверхности образцов GaAs, подвергнутой СВЧ ВПТ при $U = 50 \div 100$ В в смеси $\text{HCl} : \text{CCl}_4 : \text{O}_2$, исследовались с помощью дифракции быстрых электронов на электронографе ЭМР-100 и с помощью угольных реплик на просвечивающем микроскопе ПЭМ-100. На исходном необработанном образце на поверхности

арсенида галлия наблюдался тонкий аморфный слой, через который просвечивали рефлексы от надслоя монокристаллического GaAs. После СВЧ ВПТ с $U = 100$ V на поверхности материала наблюдалась четкая монокристаллическая структура GaAs. При $U = 50$ V при общем хорошем качестве поверхности наблюдаются мелкие ямки травления. При увеличении смещения до 100 V ямки пропадают и полученная поверхность арсенида галлия отличается хорошим качеством. Оптимальный режим для СВЧ ВПТ арсенида галлия n -типа при использовании смеси газов $\text{HCl} : \text{CCl}_4 : \text{O}_2$ реализуется при температуре подложки 200°C и $U = 70 \div 100$ V. При этом наблюдаются высокие скорости травления и хорошее качество поверхности обработанных образцов.

На рис. 2 показаны зависимости фотосигнала (U_{ph}) от напряжения электрического смещения на встречно-штыревой МПМ-структуре ($a = 5 \mu\text{m}$, $d = 10 \mu\text{m}$, $h = 100 \mu\text{m}$, $N = 10$) для трех образцов, подвергнутых СВЧ ВПТ в смеси $\text{HCl} : \text{CCl}_4 : \text{O}_2 = 2 : 2 : 1$ при разных ускоряющих напряжениях: 50 V (кривая 1), 100 V (кривая 2) и 150 V (кривая 3). Кривые сняты для длины волны света 860 nm, нагрузки 1 к Ω , падающей оптической мощности света $1 \mu\text{W}$. Для ускоряющего напряжения 150 V фоточувствительность образца составляет $0.3\text{--}0.4$ A/W, что соответствует всем известным данным для таких структур. Фоточувствительность более 0.4 A/W получена для ускоряющих напряжений 50 и 100 V. Наибольшая фоточувствительность (≈ 1 A/W) получена для ускоряющего напряжения 100 V, что является свидетельством включения механизмов внутреннего фотоусиления, связанного с изменением концентрации центров захвата/генерации носителей заряда в поверхностном слое полупроводника. Изменение состава смеси газов может приводить и к снижению фоточувствительности МПМ-структур. Так, в смеси газов $\text{HCl} : \text{CCl}_4 : \text{O}_2$ увеличение процентного содержания HCl приводит к росту травления окисного слоя и генерации центров рекомбинации неравновесных носителей. Например, травление в смеси газов $\text{HCl} : \text{CCl}_4 : \text{O}_2 = 4 : 2 : 1$ приводит к уменьшению фоточувствительности в $1.5\text{--}2.0$ раза от 0.3 до $0.1\text{--}0.15$ A/W.

Таким образом, сухая обработка арсенида галлия в СВЧ ВПТ является эффективным и тонким инструментом воздействия на поверхность полупроводника и требует оптимального состава смеси газов и напряжения смещения в реакторе. Для арсенида галлия n -типа ($N_d = 10^{14} \div 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) оптимальными параметрами СВЧ ВПТ следует считать смесь $\text{HCl} : \text{CCl}_4 : \text{O}_2 = 2 : 2 : 1$ при $U = 90 \div 100$ V.

Список литературы

- [1] Пат. 1800506 РФ, МКИ Н01 L 31/07. Быстродействующий фотодетектор / Н.М. Ушаков, В.И. Петросян, № 4942723/25; Заявл. 29.04.91; Оpubл. 07.03.93. Бюл. В. 9. С. 4.
- [2] Ушаков Н.М., Петросян В.И. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 14. С. 60–63.
- [3] Терентьев С.А., Ушаков Н.М., Солодкий А.Н., Петросян В.И. // Матер. II Всес. конф. по фотоэл. явл. в п/п. Ашхабад, 1991. С. 23–25.
- [4] Яфаров Р.К., Терентьев С.А. Способ плазменного травления арсенида галлия с собственным окисным слоем. А.с. СССР № 1807533 от 05.10.1992 г.
- [5] Игнатьев А.С., Терентьев С.А., Яфаров Р.К. // Микроэлектроника. 1993. № 4. С. 14–21.