

Применение электрохимического вольт-фарадного профилирования для диагностики примесного состава полупроводниковых подложек и многослойных приборных структур

Л.И. Ивкин, Г.Е. Яковлев

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в данной работе представлены результаты исследования подложечных и многослойных эпитаксиальных структур на основе различных полупроводниковых материалов, применяемых в микроэлектронике. Проведены измерения подложек на основе карбида кремния и полупроводникового монокристаллического алмаза и приборных структур на основе арсенида галлия, нитрида галлия и фосфида галлия. Продемонстрирована возможность применения метода электрохимического вольт-фарадного профилирования для изучения сложных структур, используемых в СВЧ-микроэлектронике и оптоэлектронике.

Ключевые слова: электрохимическое вольт-фарадное профилирование, ECV, концентрация основных носителей заряда, GaAs, GaN, монокристаллический алмаз, SiC, GaP

1. Введение

Широкая номенклатура устройств микроэлектроники различного назначения обуславливает необходимость применения большого числа полупроводниковых материалов и формируемых на их основе приборных структур. При этом рабочие параметры готовых приборов определяются в первую очередь характеристиками исходных подложек и многослойных эпитаксиальных структур. Ключевыми из этих характеристик являются концентрация, тип и пространственное распределение электрически активных примесей в различных функциональных слоях и достигаемая подвижность носителей заряда.

Традиционные методы контроля, включая измерения на основе эффекта Холла и вольт-фарадное (C-V) профилирование, требуют предварительной технологической подготовки образцов, нанесения металлических контактов [1] и имеют ограничения при исследовании многослойных гетероструктур. Эти ограничения в случае C-V измерений связаны с максимальной глубиной профилирования, лимитированной напряжением пробоя, и невозможностью локализации измерений методом Холла, при котором регистрируется суммарный отклик от всех эпитаксиальных слоев. В качестве эффективной альтернативы в работе продемонстрировано применение метода электрохимического вольт-фарадного (ECV) профилирования для диагностики полупроводниковых структур.

Объектами исследования выступили подложечные структуры на основе SiC и полупроводникового монокристаллического алмаза, а также многослойные эпитаксиальные структуры на основе GaAs, GaN и GaP, которые в настоящее время широко используются при создании полупроводниковых структур для силовой, СВЧ- и оптоэлектроники.

2. Метод исследования

Метод ECV основан на использовании электролита для формирования

выпрямляющего (шоттки) контакта с образцом вместо традиционного металлического. Такой подход позволяет последовательно чередовать два процесса: контролируемое электрохимическое травление материала и вольт-фарадные измерения. Оба процесса реализуются в одной электрохимической ячейке, что позволяет выполнять повторяющиеся циклы травления и измерений без промежуточных операций. Метод не требует предварительного изготовления металлических контактов к образцу [2] и обеспечивает построение профиля концентрации основных носителей заряда (ОНЗ) на глубину до десятков микрон с разрешением до 1 нм. Широкий выбор материалов электролита позволяет регулировать высоту барьера Шоттки, что устраняет ограничения классического метода C-V измерений и расширяет спектр исследуемых материалов.

3. Результаты измерений подложечных структур

Карбид кремния (SiC). SiC представляет собой широкозонный полупроводник, обладающий инертностью по отношению к большинству кислот и высокой теплопроводностью. Карбид кремния находит широкое применение в качестве материала подложки в силовой и СВЧ микроэлектронике, в частности для изготовления НЕМТ-структур на основе GaN. Подложечные структуры SiC должны характеризоваться высокой однородностью легирования по объему.

Для ECV-профилирования SiC применяется электрохимическое травление с использованием водных растворов: КОН – для образцов n-типа проводимости и NH₄HF₂ – для образцов p-типа. На рисунке 1 представлены профили распределения концентрации ОНЗ для подложек SiC-4H (1120) обоих типов проводимости, выращенных методом физического осаждения из газовой фазы.

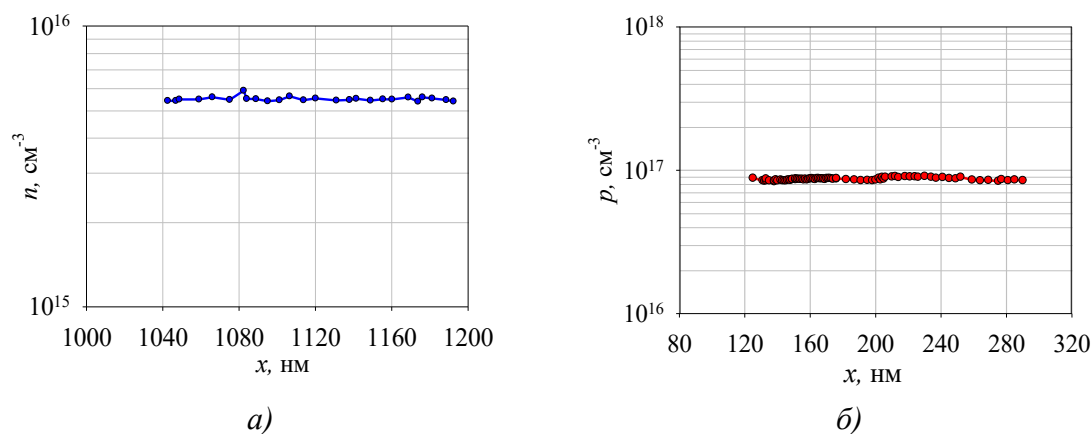


Рисунок 1. Профили концентрации ОНЗ подложек SiC-4H (1120): а) подложка n-типа проводимости, б) подложка p-типа.

Полученные профили демонстрируют однородность легирования: концентрация ОНЗ для образца n-типа составляет $\sim 5.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, для образца p-типа $\sim 8-9 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Результаты хорошо согласуются с технологическими данными, что подтверждает применимость ECV-метода для диагностики подложек SiC.

Монокристаллический полупроводниковый алмаз. В настоящее время алмаз рассматривается в качестве перспективного материала для применения в сверхмощных СВЧ-приборах. Кроме того, он активно исследуется и применяется в биосенсорах [3], детекторах ионизирующего излучения и других устройствах. Ключевыми особенностями данного материала являются широкая запрещенная зона (5.45 эВ), высокая подвижность носителей заряда, радиационная стойкость и, что особенно важно для ECV измерений, химическая инертность [4].

В связи с невозможностью травления алмаза в рамках стандартной процедуры данный этап исключается из профилирования и используется режим «depletion», в котором профиль распределения концентрации ОНЗ строится как в классическом C-V методе. В случае ограниченных размеров образцов для подачи электролита используется уплотнительное кольцо малого диаметра, что позволяет проводить измерения на ограниченной площади и строить карты распределения концентрации ОНЗ для крупных образцов. Измерения алмазных пластин, выращенных методом НРНТ и легированных бором, проводились с использованием различных электролитов. Далее приведен профиль, полученный при использовании водного раствора H_2SO_4 (рисунок 2). Результаты демонстрируют равномерное распределение концентрации дырок порядка $1.1-1.3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

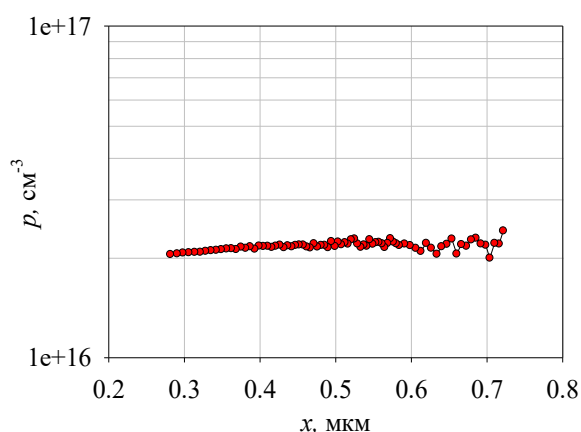


Рисунок 2. Профиль распределения концентрации ОНЗ по глубине образца полупроводникового алмаза.

4. Результаты измерений приборных многослойных структур

Арсенид галлия (GaAs). GaAs является одним из наиболее распространенных полупроводниковых материалов типа A_3B_5 . На его основе изготавливаются различные приборные структуры, включая НЕМТ или светодиодные устройства [5,6]. Исследование таких структур осложняется наличием многослойных систем с различным составом и уровнем легирования. В таких случаях необходимы высокое вертикальное разрешение и возможность измерения на глубинах, превышающих пределы классического C-V метода. ECV профилирование отвечает указанным требованиям и позволяет строить профили концентрации ОНЗ по всей глубине структур. На рисунке 3, а представлен результат измерения GaAs НЕМТ-структуры. В качестве электролита использовался водный раствор Tiron. На профиле отчетливо выделяются поверхностный проводящий слой с концентрацией электронов $3.3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и два пика, соответствующих эмиттерному слою ($3.6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и области квантовой ямы ($1.6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

Нитрид галлия (GaN). GaN также применяется как активная область НЕМТ- и светодиодных структур. Исследование данного материала методом ECV профилирования осложнено наличием значительного числа ростовых дефектов, которые препятствуют реализации полирующего характера травления. Для решения этой проблемы используется импульсный режим травления, позволяющий минимизировать локальные протравы в материале. В качестве электролита для травления и измерений GaN применяют сильно разбавленные водные растворы NaOH или KOH. На рисунке 3, б представлен результат профилирования GaN НЕМТ-структуры. На профиле зарегистрирован четкий пик концентрации ОНЗ, достигающий $1.2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, что соответствует области легированного проводящего канала.

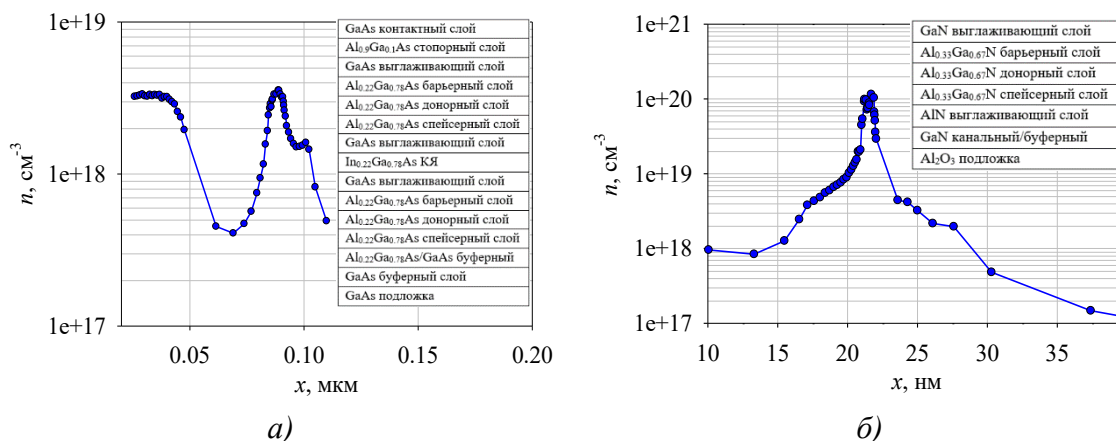


Рисунок 3. Профиль распределения концентрации ОНЗ: а) GaAs HEMT, б) GaN HEMT

Фосфид галлия (GaP). GaP привлекает внимание исследователей в области оптоэлектроники благодаря широкой запрещенной зоне, высокой радиационной стойкости и нелинейно-оптическим свойствам [7]. На его основе изготавливаются светодиоды, фотодетекторы и другие фотоэлементы. На данный момент он активно изучается для применения в солнечных элементах [8]. В рамках данной работы были исследованы как подложечные, так и более сложные структуры на основе GaP, в том числе $p-i-n$ -структура. Фосфид галлия также является химически стойким материалом, поэтому для обеспечения оптимального качества травления была применена комбинация травителей. Основным травителем являлся раствор серной кислоты, который на несколько итераций травления заменялся раствором соляной кислоты. Такой подход позволил построить профиль концентрации ОНЗ по всей глубине функциональных слоев. Результат профилирования представлен на рисунке 4. На профиле четко различимы участки, соответствующие p -, i -, n -областям.

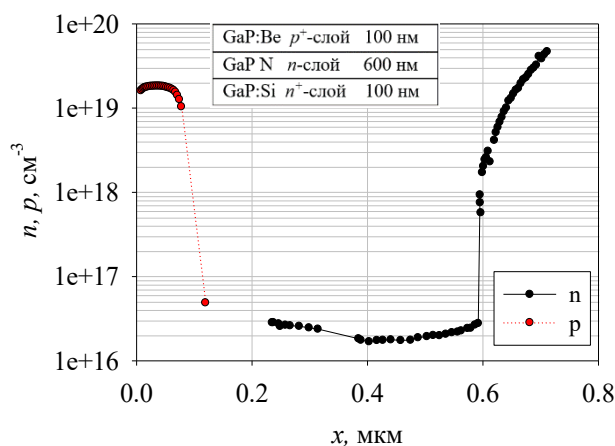


Рисунок 4. Профиль концентрации ОНЗ $p-i-n$ -структуры на основе GaP

5. Заключение

В результате выполненного исследования подтверждена универсальность метода электрохимического вольт-фарадного профилирования для диагностики распределения концентрации основных ОНЗ по глубине различных полупроводниковых материалов и многослойных эпитаксиальных структур. Показано, что ECV-метод позволяет с высокими разрешением и глубиной

профилирования исследовать образцы без предварительной технологической подготовки. На примере подложек SiC-4H (1120) обоих типов проводимости продемонстрирована возможность оценки однородности легирования. Полученные значения концентраций хорошо согласуются с технологическими данными. В случае полупроводникового алмаза реализованы измерения в режиме «depletion», позволившие построить профиль распределения концентрации ОНЗ без применения травления. При исследовании приборных гетероструктур метод ECV обеспечил четкое разделение функциональных областей. В GaAs НЕМТ-структуре зафиксированы поверхностный проводящий слой, эмиттерная область и квантовая яма. В GaN НЕМТ-структуре выделен легированный проводящий канал. Для GaP *p-i-n*-структуры с использованием комбинации травителей построен полный профиль концентрации ОНЗ с четко различимыми функциональными слоями.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 25-72-10082)**.

Список литературы

1. Павлов Л.П. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов Издательство: Высшая школа Год: 1987 Страниц: 240
2. Яковлев Г.Е., Фролов Д.С., Зубков В.И. Диагностика полупроводниковых структур методом электрохимического вольт-фарадного профилирования. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2021;87(1):35-44.
3. Плесков Ю.В. Синтетический алмаз в электрохимии // Успехи химии. 1999. Vol. 68, № 5. P. 416.
4. Nebel C. E. et al. Diamond for bio-sensor applications //Journal of Physics D: Applied Physics. – 2007. – Т. 40. – №. 20. – С. 6443-6466.
5. Дудин А. Л. и др. Исследование PHEMT-структур с квантовыми ямами AlGaAs/InGaAs/GaAs, выращенных молекулярно-пучковой эпитаксией //Прикладная физика. – 2017. – №. 3. – С. 78.
6. Ban D. et al. Optimized GaAs/ AlGaAs light-emitting diodes and high efficiency wafer-fused optical up-conversion devices //Journal of applied physics. – 2004. – Т. 96. – №. 9. – С. 5243-5248.
7. Wang Y. et al. A review of gallium phosphide nanophotonics towards omnipotent nonlinear devices //Nanophotonics. – 2024. – Т. 13. – №. 18. – С. 3207-3252.
8. Darnon M. et al. Solar cells with gallium phosphide/silicon heterojunction //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2015. – Т. 1679. – №. 1. – С. 040003.