

06

Влияние гетероструктуры $\text{In}_{0.56}\text{Ga}_{0.44}\text{P}/\text{Ge}$ на диффузию фосфора в германии при формировании многокаскадного солнечного элемента

© С.П. Кобелева, И.М. Анфимов, С.Ю. Юрчук, Е.А. Выговская, Б.В. Жалнин

Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“, Москва
Научно-производственное предприятие „Квант“, Москва
E-mail: kob@misis.ru

Поступило в Редакцию 7 августа 2012 г.

Изучали профили фосфора в германии, легированном галлием, полученные при формировании первого каскада трехкаскадного солнечного элемента на основе структур $\text{A}^3\text{B}^5/\text{Ge}$ (Ga). Методом вторичной ионной масс-спектрометрии получены профили фосфора и галлия в германии после обработки в потоке фосфина и в структуре $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}/\text{In}_{0.56}\text{Ga}_{0.44}\text{P}/\text{Ge}$. Отмечено, что основное количество фосфора поступает из соединения $\text{In}_{0.56}\text{Ga}_{0.44}\text{P}$ одновременно с диффузией галлия. Проведены расчеты диффузионных профилей фосфора в германии. Показано, что диффузия фосфора из буферного слоя $\text{In}_{0.56}\text{Ga}_{0.44}\text{P}$, являющегося одновременно источником галлия, является координатно-зависимой и для ее описания необходимо привлечение математических моделей, учитывающих не только диффузионную, но и дрейфовую компоненту потока атомов фосфора.

В последнее десятилетие наблюдается возрождение интереса к германию как перспективному материалу микро- и наноэлектроники. В частности, германий рассматривается как наиболее подходящий материал для первого каскада многокаскадных солнечных элементов на основе соединений A^3B^5 , предназначенного для преобразования инфракрасной части солнечного спектра [1]. Гетероструктуры солнечных элементов выращивают методом МОС-гидридной эпитаксии, а $p-n$ переход в германиевом субэлементе формируется диффузией фосфора в сильнолегированную подложку германия. Для расчета диффузионных

режимов необходима информация о механизмах и коэффициентах диффузии фосфора в германии. Литературные данные неоднозначны и имеют большой разброс значений коэффициентов диффузии [2–4], что связано с сильной зависимостью диффузии фосфора от состояния матрицы германия. Целью данной работы было получение экспериментальных профилей распределения фосфора в германии и оценка применимости разработанных в последнее время диффузионных моделей для описания диффузии при формировании германиевого субэлемента мультикаскадных солнечных батарей на основе соединений A^3B^5 .

Образцы для исследования получены методом МОС-гидридной эпитаксии на реакторе Veeco E450 LDM. Образец № 1 представлял германиевую подложку ориентацией (100), легированную галлием ($N_{Ga} = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), в которую из газовой фазы (поток фосфина $800 \text{ cm}^3/\text{min}$) при температуре 635°C проведена диффузия фосфора в течение 2.5 min. В образце № 2 после аналогичной обработки в потоке фосфина проведено нанесение буферного слоя $\text{In}_{0.56}\text{Ga}_{0.44}\text{P}$ (1 min при $T = 635^\circ\text{C}$) и сильнолегированного слоя $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ (1.6 min при той же температуре).

Измерения профилей распределения галлия, фосфора и германия проведены методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на установке РНИ-6600. Для калибровки результатов измерений были изготовлены тестовые образцы германиевых подложек (100), легированных галлием до концентрации 10^{18} cm^{-3} , имплантированные галлием и фосфором до предельно высоких концентраций в максимуме пика (10^{20} cm^{-3}). Энергия имплантированных ионов 100 keV .

Расчеты профилей распределения фосфора проводили численным методом. Программа расчета и параметры диффузионных моделей приведены в [4]. Рассматривали три модели — модель с постоянным при данной температуре коэффициентом диффузии, характерная для межузельного механизма (модель D_{const}), и вакансионные модели, учитывающие наличие двухкратно [2] и трехкратно ионизованных вакансий [3] (модели V^{2-} и V^{3-} соответственно).

На рис. 1 представлены профили распределения фосфора в германии в образцах 1 и 2. В [1] было отмечено, что параметры режима обработки германия фосфином не влияют на глубину залегания $p-n$ перехода, формируемого диффузией фосфора. Как это следует из рис. 1, на первом этапе практически не происходит внедрения фосфора в матрицу, что объясняет отсутствие влияния величины потока фосфина на глубину

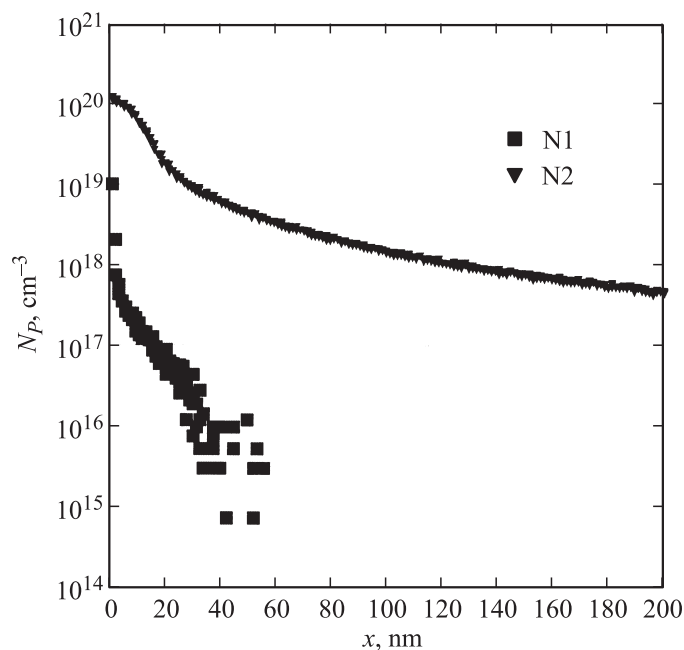


Рис. 1. Профили фосфора в германии: N 1 — образец № 1, N 2 — образец № 2.

залегания $p-n$ перехода в аналогичной структуре [1]. Формирование $p-n$ перехода происходит в процессе выращивания буферного и последующих слоев. Максимальная концентрация фосфора на поверхности соответствует имеющимся в литературе данным $\sim 1.5 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ [5].

На рис. 2 приведены профили фосфора, галлия и германия в образце № 2. В германии на расстоянии до 26–28 nm от поверхности концентрация галлия превосходит концентрацию фосфора, что может приводить к появлению инверсного слоя, отмеченного в [1,4]. В этой области диффузия фосфора идет заметно медленнее, чем можно ожидать по известным литературным данным (см. рис 3). Исходя из характера диффузионного профиля фосфора, можно предположить, что имеет место координатно-зависимая диффузия, при которой может происходить как ускорение, так и замедление диффузионного процесса [6]. Такой характер диффузии наблюдается при координатной зависимости параметров, определяю-

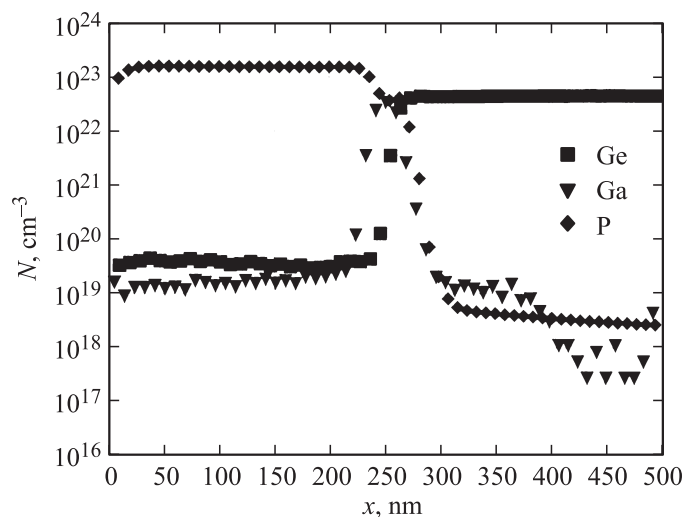


Рис. 2. Профили фосфора (P), галлия (Ga) и германия (Ge) в образце № 2.

ших диффузионный процесс (концентрации дефектов решетки, частоты перескоков и др.). При анализе координатно-зависимой диффузии необходимо рассматривать не только диффузионные, но и дрейфовые потоки диффундирующих атомов. Если направление дрейфовой и диффузионной компонент потока противоположны, может иметь место как замедленная диффузия, что возможно и наблюдается на первом участке, так и „застывание“ профиля ($dN_p/dt = 0$) [6]. Последнее имеет место в случае равенства диффузионных и дрейфовых потоков. Как хорошо видно из рис. 2–3, в области формирования $p-n$ перехода градиент концентрации незначителен и условие равенства потоков может быть легко достигнуто. Наличие участка с „застывшим“ профилем объясняет отсутствие зависимости глубины $p-n$ перехода от толщины буферного слоя InGaP от 35 до 150 nm [1], хотя для такого его увеличения необходимо пропорциональное увеличение времени проведения процесса, что для координатно независимой диффузии должно приводить к заметному изменению профиля фосфора и глубины $p-n$ перехода.

Проведенные исследования показывают, что основным источником фосфора при формировании $p-n$ перехода германиевого суб-элемента

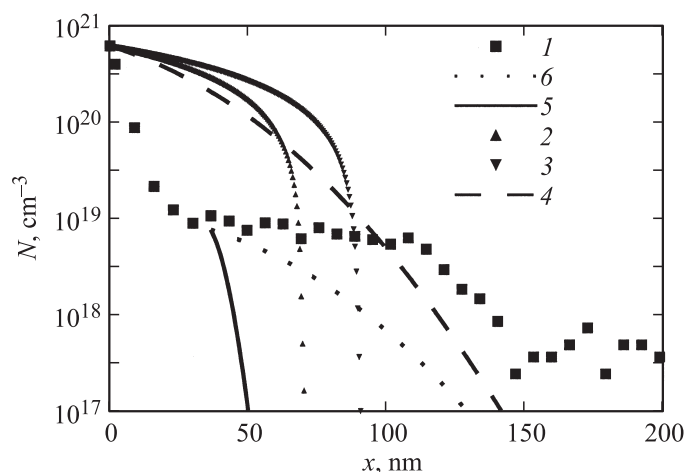


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные профили фосфора в германии (образец № 2): 1 — эксперимент, 2–6 — расчеты; 2 — модель V^{3-} , 3 — модель V^{2-} , 4 — модель D_{const} , 5 — модель V^{3-} , 6 — модель D_{const} , $N_p(0) = 6 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (2–4), $N_p(0) = 8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (5–6).

многокаскадного солнечного элемента в структуре $In_xGa_{1-x}P/Ge$ является слой $In_xGa_{1-x}P$ на поверхности германия. В приповерхностной области имеется инверсный слой, в котором концентрация галлия превышает концентрацию фосфора. Диффузия фосфора в германии при наличии слоя $In_xGa_{1-x}P$ на поверхности носит координатно-зависимый характер.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП „Материаловедение“ НИТУ МИСиС в рамках реализации ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 годы.

Список литературы

- [1] Kalyuzhnyy N.A., Gudovkikh A.S., Evstropova V.V., Lantratova V.M., Mintairova S.A., Timoshina N.Kh., Shvartsa M.Z., Andreeva V.M. // Semiconductors. 2010. V. 44. P. 1520.

- [2] *Brotzmann S.* // J. Appl. Phys. 2008. V. 103. P. 0335081.
- [3] *Canneaux T., Matthiot D., Ponpon J.-P., Leroy Ya.* // Thin Sol. Films. 2010. V. 518. P. 2394.
- [4] *Колбева С.П., Кузьмин Д.А., Юрчук С.Ю., Мурашев В.Н., Анфимов И.М., Щемеров И.В., Жалнин Б.В.* // Изв. вузов. МЭТ. 2011. № 2. С. 56.
- [5] *Chui C.O., Kulig L., Moran J., Tsai W.* // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87. P. 091909.
- [6] *Малкович Р.Ш.* // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 2. С. 137.