

Элементная база электроники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: / <http://www.electronics.ru/issue/2006/5/4>

6. Dyer, C. S. Space radiation effects for future technologies and missions / C. S Dyer, G. Hopkinson (Rep.ref.QINETIQ/KI/SPACE/TR010690/1.1) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // http://reat.space.qinetiq.com/Reat/wp1_tn/Document_text.html

7. Bytkin, S. V. Silicon doped with germanium (n-Si<Ge>) usage for manufacturing of radiation hardened devices and integrated circuits / S. V. Bytkin // 4th Europ. Conf. on radiation and its effects on components and systems Proc. Cannes (France). – 1997. – P. 141–146.

8. ГОСТ 19138.0–85. Тиристоры. Общие требования к методам измерения параметров. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // <http://gosts.skgvh.ru/Index/20/20337.htm>

9. ГОСТ 19138.6–86. Тиристоры. Методы измерения электрических параметров. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // <http://gosts.skgvh.ru/Index/12/12223.htm>

10. Критская, Т. В. Управление свойствами и разработка промышленной технологии монокристаллического кремния для электроники и солнечной энергетики / Т. В. Критская // Дисс. ... докт. техн. наук. – Запорожье, 2006. – 375 с.

11. Быткин, С. В. Материалы и процессы в технологии кремниевых приборов, устойчивых к действию ионизирующих излучений: анализ эффективности применения / С. В. Быткин, О. В. Быткина. – Запорожье: Изд-во ЗГИА, 1997. – 84 с.

12. Кузьмин, В. А. Четырехслойные полупроводниковые приборы / В. А. Кузьмин, К. Я. Сенаторов. – М.: Энергия, 1967. – 184 с.

13. Вологдин, Э. Н. Радиационные эффекты в некоторых классах полупроводниковых приборов / Э. Н. Вологдин, А. П. Лысенко. – М., 2001. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // http://window.edu.ru/window/library?p_rid=55864

14. О Федеральной целевой программе «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы (в ред. Постановления Правительства РФ от 26.11.2007 № 809). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // <http://www.intpark.noolab.ru/uploads/1245030251.doc>

15. Вологдин, Э. Н. Радиационная стойкость биполярных транзисторов / Э. Н. Вологдин, А. П. Лысенко. – М., 2000. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // http://window.edu.ru/window/library?p_rid=558643

16. Герлах, В. Тиристоры / В. Герлах – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 345 с.

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРВОГО КАСКАДА ТРЕХКАСКАДНОГО СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ФОСФОРА В ГЕРМАНИИ

© 2012 г. С. П. Кобелева¹, И. М. Анфимов¹, Б. В. Жалнин²,
О. В. Торопова¹, Т. В. Критская³

¹ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,

²Научно–производственное предприятие «Квант»

³Запорожская государственная инженерная академия, Украина

Методом МОС–гидридной эпитаксии изготовлены структуры $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}/\text{In}_{0,56}\text{Ga}_{0,44}\text{P}/\text{Ge}$, представляющие собой первый каскад трехкаскадных солнечных элементов $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}/\text{Ge}$. $\text{P}-\text{n}$ -переход сформирован диффузией фосфора в германий, легированный галлием. Методом ВИМС получены профили фосфора и галлия в германии. Показано, что изменение потока фосфина не влияет на характер распределения фосфора и глубину $\text{p}-\text{n}$ -перехода в германиевом каскаде.

Ключевые слова: диффузия фосфора в германии, координатно–зависимая диффузия, солнечный элемент, гетероструктура InGaP/Ge .

Диффузия фосфора — технологический этап создания $\text{p}-\text{n}$ -перехода в германии в составе трехкаскадного солнечного элемента на основе соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ [1, 2]. Моделирование процесса диффузии и расчет профиля распределения фосфора в зависимости от технологических условий получения структуры позволяет оптимизировать технологические режимы без привлечения дорогостоящих экспериментов. В работе [2] было показано, что известные диффузионные модели фосфора в германии неудовлетворительно описывают определенную методом электрохимического профилирования глубину залегания $\text{p}-\text{n}$ -переходов в германиевом субэlemente. Цель работы — экспериментальное определение профилей распределения фосфора в германии в структуре $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}/$

$\text{In}_{0,56}\text{Ga}_{0,44}\text{P}/\text{Ge}$ и изучение влияния на распределение фосфора потока фосфина на первом этапе технологического цикла создания первого каскада трехкаскадного солнечного элемента.

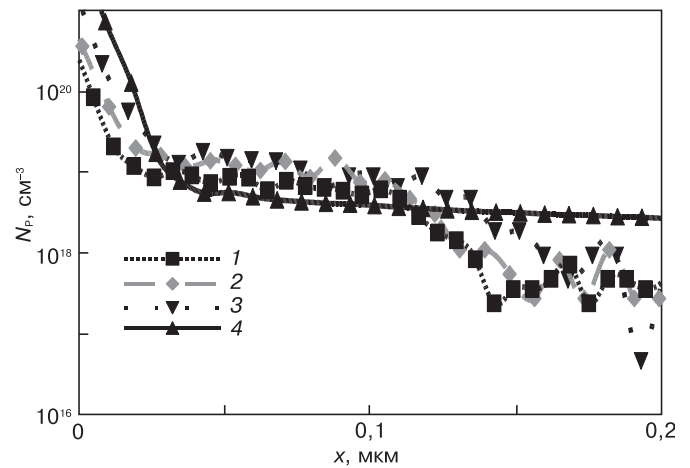
Образцы для исследования были получены методом МОС–гидридной эпитаксии на реакторе Veeco E450 LDM. На германиевую подложку с ориентацией (100), легированную галлием (до концентрации $N_{\text{Ga}} = 10^{18} \text{ см}^{-3}$), на первом этапе из газовой фазы при температуре 635 °С проведена диффузия фосфора в течение 2,5 мин. Затем нанесен буферный слой $\text{In}_{0,49}\text{Ga}_{0,51}\text{P}$ (в течение 1 мин при $T = 635 \text{ °C}$) и сильнолегированный слой $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}$ (1,6 мин. при той же температуре). В образцах 1–3 варьировали поток фосфина (600, 800 и 1200 $\text{ см}^3/\text{мин}$ соответственно).

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 подложек Ge (100), легированных галлием до концентрации 10^{18} см^{-3} , имплантированные галлием и фосфором до предельно высоких концентраций в максимуме пика (10^{20} см^{-3}). Энергия имплантированных ионов составляла 100 кэВ.

На рисунке показаны профили распределения фосфора в германии. Границу германия определяли по началу падения концентрации германия в структуре. Увеличение потока фосфина приводит к росту концентрации фосфора на границе структуры $\text{In}_{0,56}\text{Ga}_{0,44}\text{P}/\text{Ge}$. На профиле наблюдается два участка — в приповерхностной области резкое уменьшение концентрации фосфора свидетельствует о небольшой величине коэффициента диффузии фосфора (в этой области концентрация галлия превышает концентрацию фосфора во всех образцах). Далее следует область с практически постоянной концентрацией (~100 нм). Как следствие, глубина p — n -перехода остается практически постоянной. Очевидно, в данном случае имеем дело с координатно-зависимой диффузией, для описания которой недостаточно использования уравнений, рассмотренных в работе [2], что и объясняет расхождение наблюдаемых и рассчитанных величин p — n -переходов.

В случае координатно-зависимой диффузии необходимо рассматривать как диффузионные, так и дрейфовые потоки [3]. Если направления дрейфовой и диффузионной компонент потока противоположны, может иметь место как замедленная диффузия, что возможно и наблюдается на первом участке, так и «застывание» профиля ($dN_p/dt = 0$) [3]. Последнее имеет место в случае равенства диффузионных и дрейфовых потоков. Как хорошо видно из рисунка, в области формирования p — n -перехода градиент концентрации незначителен, и условие равенства потоков может быть легко достигнуто.

В работе [1] было отмечено, что глубина залегания p — n -перехода в германиевом субэлементе с аналогичной структурой буферного и переходного слоев не зависит от изменения толщины буферного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$. В рассматриваемом случае толщина слоя, определенная по профилю галлия в структуре, для образцов 1—3 составляет 16 ± 2 , 18 ± 2 и 14 ± 2 нм, а глубина p — n -перехода в германии 120, 135 и 120 нм соответственно. В работе [1] толщина буферного слоя изменялась от 35 до 150 нм, в то время как глубина p — n -перехода, определенная также методом ВИМС, составила ~140 нм и не зависела от толщины буферного слоя, т. е. от времени выращивания этого слоя (и, как следствие, времени диффузии фосфора). Наблюдаемое противоречие авторы работы [1] объяснили тем, что глубина p — n -



Профили распределения фосфора в образцах 1—3 (1—3) и галлия (4) в германии

перехода формируется в процессе выращивания всех каскадов, так что общее время диффузии заметно больше, чем время выращивания буферного слоя. Однако, судя по изложенным в работе [1] результатам, все данные относились только к первому каскаду, т. е. процесс диффузии проходил только во время формирования германиевого субэлемента. Если в процессе формирования диффузионного слоя сложились условия, соответствующие «застыванию» профиля фосфора (что могло иметь место, так как в области формирования перехода практически отсутствует градиент концентрации фосфора), это могло привести к наблюдаемой в работе [1] стабилизации глубины p — n -перехода.

Заключение

Изучение профилей распределения фосфора в германии легированном галлием при формировании гетероструктуры $\text{In}_{0,01}\text{Ga}_{0,99}\text{As}/\text{In}_{0,56}\text{Ga}_{0,44}\text{P}/\text{Ge}(\text{Ga})$ показало, что на границе германия концентрация галлия превышает концентрацию фосфора, что приводит к формированию дополнительного p — n -перехода на глубине порядка 20 нм. В этой области наблюдаются большие градиенты концентраций фосфора и германия, но коэффициент диффузии фосфора заметно отличается от литературных данных. Во второй области размером порядка 100 нм профили пологие и на глубине 120 нм формируется основной n — p -переход первого каскада солнечного элемента на основе германия. Увеличение потока фосфина от 600 до $1200 \text{ см}^3/\text{мин}$ приводит к увеличению концентрации фосфора на границе германия от $2 \cdot 10^{20}$ до 10^{21} см^{-3} , но практически не меняет вида профиля и глубины основного p — n -перехода. Форма диффузионного профиля указывает на то, что диффузия фосфора из слоя $\text{In}_{0,56}\text{Ga}_{0,44}\text{P}$ в присутствии галлия в матрице является координатно зависимой.

Библиографический список

1. Калюжный, Н. А. Германиевые субэлементы для многопереходных фотоэлектрических преобразователей GaInP/

GaInAs/Ge / Н. А. Калюжный, А. С. Гудовских, В. В. Евстропов, В. М. Лантратов, С. А. Минтаиров, Н. Х. Тимошина, М. З. Шварц, В. М. Андреев // ФТП. – 2010. – Т. 44, № 11. – С. 1568—1576.

2. Кобелева, С. П. Диффузия фосфора в германии на границе наногетероструктуры InGaP/Ge / С. П. Кобелева, Д. А. Кузь-

мин, С. Ю. Юрчук, В. Н. Мурашев, И. М. Анфимов, И. В. Шемеров, Б. В. Жалнин // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2011. – № 2. – С. 56—60.

3. Малкович, Р. Ш. К анализу координатно-зависимой диффузии / Р. Ш. Малкович // ЖТФ. – 2006. – Т. 76, № 2. – С. 137—140.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Металлургия и материаловедение» НИТУ МИСиС в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы.

УДК 621.315.592

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КВАНТОВОГО ВЫХОДА InGaN/Si-СВЕТОДИОДОВ ОТ ПЛОТНОСТИ ТОКА

© 2012 г. О. И. Рабинович, В. П. Сушков
ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Исследован эффект уменьшения квантового выхода InGaN светоизлучающих диодов при увеличении плотности тока. Определены причины, влияющие на этот эффект. Показаны способы уменьшения падения квантового выхода и положительные результаты применения кремниевых подложек в многокомпонентных наногетероструктурах для InGaN светоизлучающих диодов.

Ключевые слова: светодиод, InGaN, кремний, деградация, моделирование.

Введение

Успехи и достижения в исследовании и производстве многокомпонентных наногетероструктур (МКНГ) на основе твердых растворов $Al_yIn_xGa_{1-x-y}N$ сделали реальностью применение светоизлучающих диодов (СИД) на их основе практически во всех областях промышленности.

Высокая теплопроводность соединений элементов III группы Периодической таблицы Д. И. Менделеева и широкий диапазон изменения значений запрещенной зоны, несмотря на отличительную черту материалов — пьезоэлектрическое поле и возможную спонтанную поляризацию, делают их особенно интересными для применения в оптоэлектронных приборах, высокоомощной и высокочастотной электронике [1—5]. Одними из главных представителей оптоэлектронных полупроводниковых приборов являются СИД. Количество областей применения InGaN СИД неуклонно растет. Сегодня практически решены проблемы ограниченности диапазона цветов и создания СИД белого цвета свечения, что ранее препятствовало использованию СИД в освещении.

Широкое применение СИД на основе AlGaInN МКНГ обнаружи-

вает и проблемы, требующие решения: изучение и прогнозирование деградации рабочих характеристик СИД при влиянии различных воздействий, увеличение эффективности.

Необходимо иметь способ получения оптимальных параметров МКНГ и СИД с максимальной экономией материальных затрат. Для подобных сложных объектов расчеты основных зависимостей, определяющих качество СИД, таких как вольт-амперные характеристики (ВАХ), внутренний квантовый выход излучения и его зависимость от плотности тока, требуют использования численных методов компьютерного моделирования [6], учитывающих все многообразие конструктивных, физических и технологических параметров МКНГ. Подобный подход был успешно продемонстрирован для AlGaInN-лазеров в работах Sh. Nakamura и А. Томчука, а также в работах [7—9] с использованием программы Sim Windows. Применение компьютерного моделирования представляется оптимальным, так как позволяет не только уточнить теоретические характеристики InGaN МКНГ, но и значительно сэкономить материальные средства при отработке технологии их получения.