ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы Новикова Германа Анатольевича на тему: «Оптоэлектронные свойства сильнолегированных сурьмой слоев германия, полученных по ионно-лучевой технологии», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 - Физика полупроводников

В настоящее время большое внимание уделяется развитию кремниевой фотоники и оптоэлектроники в ближнем ИК-диапазоне, поскольку диоксид кремния имеет минимумом оптических потерь в диапазоне длин волн 1.5-1.6 мкм. Хорошо известно. что кремний является непрямозонным полупроводником, поэтому создание на его основе светоизлучающих структур внутри кремниевых электронных чипов осложнено. Близкая ситуация наблюдается и для непрямозонного германия, хотя для квантовых точек германия-кремния этот вопрос частично решается, но интенсивности излучения слабые на 1.5 мкм. Другим подходом для усиления излучения из германия на 1.5 мкм является заполнение носителями боковой L-долины, расположенной на 0.13 эВ ниже прямой Г-долины за счет сильного легирования электронами и растяжение кристаллической решетки германия за счет эпитаксии на кремнии, что приводит к усиленной прямозонной фотолюминесценции (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ) в диапазоне 1.55-1.6 мкм. Использование импульсного лазерного отжига (ИЛО) слоев германия, легированных атомами фосфора, также приводило к росту интенсивности ФЛ. Однако в литературе отсутствуют данные о систематических исследованиях ИЛО и импульсного ионного отжига (ИИО) свойств легированных и (или) растянуто-деформированных пленок Ge. Диссертационная работа Г.А. Новикова посвящена восполнению информации о фундаментальных свойствах указанных пленок германия и поэтому является актуальной. Диссертационная работа Г.А. Новикова посвящена формированию сильнолегированных донорной примесью сурьмы (Sb) кристаллических слоёв Ge на различных подложках (Si, Ge, SiO_2, Al_2O_3) методами магнетронного и ионно-лучевого осаждения и ионной имплантации, с последующим ИИО и ИЛО, а также характеризация их структуры и оптоэлектронных свойств. Автором поставлены шесть задач, отработаны методики формирования пленок, их легирования методом ионного облучения с последующим отжигом методами ИЛО и ИИО (ионами углерода), проведено моделирование

процессов нагрева, плавления и кристаллизации объёмного Ge и тонких аморфных слоёв Ge и Моделирование процессов диффузии примеси Sb в расплаве Ge, а также проведены измерения сформированных пленок современными экспериментальными методами. Все это свидетельствует о высокой достоверности полученных в диссертации научных результатов.

К результатам, обладающим новизной и значимостью следует отнести следующие заключения:

(1) Фотолюминесценция в области длин волн 1.4-1.6 мкм при T = 77 K эпитаксиального SiGe, полученного магнетронным осаждением тонкого слоя Ge (толщина 115 нм) на подложку Si с последующим импульсным ионным (W = 1.0 Дж/см2) и термическим (800°C, 20 мин) отжигом, обусловлена дислокациями.

(2) Рабочее значение диапазона плотности энергии лазерного импульса (длина волны 0.694 мкм) для плавления структур Ge/Al_2O_3 и Ge/Si равно W = 0.2-1.2 Дж/см$_2$, тогда как для структуры Ge/SiO_2 составляет W = 0.2-0.6 Дж/см^2. Увеличение W приводит к испарению расплавленных структур.

(3) Импульсный ионный отжиг (W = 1.0 Дж/см^2) аморфного слоя Ge:Sb (толщина 300 нм) с концентрацией примеси Sb, превышающей 10^{20} см$^{-3}$, полученного ионно-лучевым осаждением на подложку p-Ge, приводит к его плавлению и последующему образованию эпитаксиального монокристаллического слоя Ge:Sb с высоким значением деформации растяжения (0.8%) и концентрации электронов (1.5×10^{20} см$^{-3}$). Данный слой демонстрирует прямозонную фотолюминесценцию на длине волны 1.66 мкм (возбуждение на 0.8 мкм) и фотопроводимость в спектральном диапазоне 0.5-2 мкм (T = 300 K).

(4) Импульсный ионный отжиг (W = 0.5 Дж/см^2) аморфного слоя Ge:Sb (толщина 150 нм) с концентрацией примеси Sb около 10^{21} см$^{-3}$, полученного имплантацией ионами Sb подложки p-Ge, приводит к образованию расплава, эпитаксиальной кристаллизации и появлению монокристаллического слоя, в котором большая часть примеси Sb (>80%) встроена в решетку Ge и является электрически активной. Данный слой демонстрирует прямозонную фотолюминесценцию на длине волны 1.61 мкм (при возбуждении на 0.8 мкм; T = 300 K).

Следует отметить теоретическую значимость работы, которая состоит в получении методом моделирования расчетных данных о нагреве и плавлении поверхности объемного кристалла Ge и пленки Ge на различных подложках (Si, Al_2O_3, SiO_2) в процессе ИЛО и ИИО, а также распределения по глубине примесных атомов Sb в образцах Ge под действием ИИО. Практическая значимость работы заключается в: (1) разработке методики увеличения уровня

легирования примеси Sb в Ge, более чем на порядок выше по сравнению с ее равновесным пределом растворимости, с использованием неравновесных методов и (2) в формировании тонкоплёночных структур толщиной 100-500 нм на основе монокристаллических сильнолегированных слоёв Ge:Sb, светоизлучающих в диапазоне длин волн 1.5-1.7 мкм и обладающих фоточувствительностью в области 0.5-2 мкм, функционирующих при комнатной температуре. Полученные в диссертационной работе Г.А. Новикова результаты будут способствовать развитию технологии создания сильнолегированных Ge плёнок и их применению в фотонике и оптоэлектронике.

Автореферат корректно описывает полученные научные результаты. Научные исследования апробированы на множестве (21) научных конференций и опубликованы в семи статьях, рекомендованных ВАК РФ или индексируемых в международных базах данных.

В качестве замечаний по диссертации следует отметить следующее:

1) автор указывает на стр. 8 и 9 автореферата ссылается на результаты микродифракции для эпитаксиальной и поликристаллической пленок германия, но на Рис 2(а, б) их не показывает;

2) на Рис. 3 показан спектр ФЛ слоя Ge (d = 115 нм), осаждённого на подогретую подложку Si с последующим ИИО (W = 1.0 Дж/см^2) и термического отжига (ТО) (Т = 800°С, 20 мин.), по виду которого автор утверждает, что ТО способствует устранению точечных дефектов (вакансии, междоузлия) как каналов безызлучательной рекомбинации. Однако это утверждение не имеет достаточных доказательств, поскольку по уширению пика ФЛ и наличию различимых слабых пиков при 1.417, 1.326 и 1.244 мкм можно сказать о сохранении частичного вклада точечных дефектов в ФЛ;

3) на Рис. 5(а) представлены дифрактограммы при скользящих углах рентгеновского излучения для слоя Ge на сапфире после осаждения (W = 0) и после термического и лазерного отжига, а в тексте на стр. 11 утверждается, что деформация растяжения составляет 0.8% без обозначения сдвига пиков германия в различных областях.

Но указанные недостатки не снижают научной значимости выполненной диссертационной работы.

По содержанию, объему, новизне и практической значимости представленных в автореферате диссертации результатов исследований, диссертационная работа Новикова Германа Анатольевича на тему: «Оптоэлектронные свойства сильнолегированных сурьмой слоев германия,

полученных по ионно-лучевой технологии», является завершенным исследованием и отвечает требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Считаю, что Новиков Герман Анатольевич заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Я, Галкин Николай Геннадьевич, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Доктор физико-математических наук, Заслуженный деятель науки РФ, профессор по специальности «физика конденсированного состояния», главный научный сотрудник лаборатории Оптики и электрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

(подпись) Галкин Николай Геннадьевич

Адрес: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5

Тел.: 8(423)2310687

E-mail: ngalk@iacp.dvo.ru

Дата «_06_» _ноября_ 2026 г.

«ЗАВЕРЯЮ»
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ИАПУ ДВОРАН
Д.Ф.-М. Н.
Д.А. Щуканов
06.11.2026 г.