

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

о диссертации Давыдовской Клавдии Сергеевны
«Влияние температуры облучения на образование радиационных дефектов в карбиде кремния и деградацию приборов на его основе», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности
1.3.11 – физика полупроводников

Диссертационная работа К. С. Давыдовской посвящена изучению электрофизических параметров 4H-SiC JBS (Junction Barrier Schottky diodes) под воздействием электронного и протонного облучения. При этом облучения производятся не только при комнатной температуре (холодное облучение), но и при повышенных температурах (горячее облучение). Несмотря на то, что карбид кремния изучается не одно десятилетие, интерес к нему не ослабевает, и интенсивность исследований SiC до сих пор поддерживается на высоком уровне. В современном обществе трудно переоценить необходимость в большом количестве энергии, основными источниками, которой могут стать такие отрасли, как атомная и солнечная энергетики. Развитие этих отраслей тесно связано со способностью приборов работать в экстремальных условиях, таких как высокие температуры и радиация. Карбид кремния обладает необходимыми для таких условий электрофизическими свойствами.

Исследования радиационной стойкости карбида кремния начались еще 60х годах прошлого века. Однако не все свойства SiC, связанные с радиационной стойкостью, полностью изучены. В карбиде кремния из-за малой подвижности первичных радиационных дефектов реализуется сравнительно редкая ситуация, когда последствия облучения при комнатной температуре зависят только от первичных собственных дефектов решетки. Усиления роли вторичных процессов можно добиться за счет повышения температуры диода при облучении. К настоящему времени отсутствовали исследования по влиянию интенсивности облучения и температуры диода на образование радиационных дефектов в карбиде кремния и на его радиационную стойкость. С учетом вышесказанного, тема настоящей диссертационной работы, посвященной выявлению влияния температуры, при которой происходит облучение диода на образование радиационных дефектов в карбиде кремния и механизма, радиационной стойкости карбида кремния, безусловно, является актуальной.

В настоящее время тема, в рецензируемой работе Давыдовской Клавдии Сергеевны, имеет большую значимость, как с точки зрения теории, так и практики, поскольку данное исследование позволит не только прогнозировать изменение характеристик 4H-SiC приборов, но и позволит лучше понимать теорию формирования радиационных дефектов в карбиде кремния.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов. Все основные положения, выводы и рекомендации, представленные в диссертационной работе, научно обоснованы и аргументированы. Сформулированные научные положения непосредственно отражают наиболее важные и новые результаты, полученные в работе, в то время как сами результаты получены с использованием современных методов исследования в данной области. Выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертации, логически вытекают из совокупности полученных результатов. Работа является продолжением бакалаврской, магистерской и аспирантской работ К.С. Давыдовской, а также обобщает результаты 15 статей данной тематики, в которой она является соавтором. Достоверность результатов проведенного исследования не вызывает сомнений, поскольку работа выполнена с использованием современных методов диагностики на современном оборудовании, а также подтверждается повторяемостью и воспроизводимостью полученных результатов.

Новизна исследований и полученных результатов. Научную новизну результатов диссертационной работы можно описать в нескольких пунктах:

- 1) Впервые проводилось комплексное исследование свойств карбида кремния и глубоких центров, возникающих в результате его облучения электронами или протонами. Это является крайне важным аспектом, поскольку обычно в работах используются либо вольт-амперные, либо емкостные исследования, а благодаря более полному исследованию, была замечена колоссальная разность между концентрациями, получаемыми из вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик на больших дозах облучения. Было установлено, что при больших дозах облучения лучше использовать вольт-амперные методы измерения, а не емкостные. Подобные особенности можно наблюдать не только в карбиде кремния, но и в других широкозонных материалах. В работе впервые была предложена теоретическая модель для объяснения экспериментальных результатов, как для малых, так и для больших доз.
- 2) Впервые изучались результаты воздействия высокотемпературного "горячего" облучения на 4H-SiC приборы. Показано, что при горячем облучении радиационная стойкость карбида кремния выше, чем при комнатном (холодном) облучении, что означает замедленный процесс деградации параметров от облучения при повышенных температурах. Это отличалось от первоначальных предположений о том, что высокая температура облучения лишь ускорит процесс деградации.

Научная ценность диссертационной работы состоит в том, что в ней впервые проведены систематические исследования, раскрывающие связь между температурой электронного облучения и энергетическими спектрами радиационных дефектов. Более того показано, что горячее облучение создает спектр дефектов, отличный от спектра, возникающего при холодном облучении. Кроме того, показано, что поскольку радиационная стойкость карбида кремния оказывается выше при высоких температурах, это позволит экономить на частичном отводе тепла, и может привести к повышению срока службы устройств на основе карбида кремния. Разработанная модель позволит прогнозировать измерения электрофизических параметров в карбиде кремния под воздействием протонов и электронов, как на малых, так и на больших дозах. Более того, гипотетически, модель в будущем можно будет использовать для других широкозонных полупроводников при учете других спектров вводимых дефектов. Полученные результаты, несомненно, имеют большое практическое значение.

В диссертационной работе все методические подходы и результаты изложены достаточно полно и четко. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в научной печати. Содержание автореферата полностью соответствует положениям диссертации.

Краткая характеристика основного содержания диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 143 страницы. Работа содержит 54 рисунка и 17 таблиц. Список цитируемой литературы составляет 132 наименования.

Введение посвящено актуальности темы диссертации, практической и научной значимости полученных результатов, а также новизне проведенных исследований. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложены свойства карбида кремния, особенно в качестве материала для полупроводниковой силовой электроники. Часть главы посвящена видам дефектов кристаллической решетки и радиационному дефектообразованию. Также в ней описываются известные виды дефектов и примесей карбида кремния, а также их свойства.

Во второй главе описываются измерительные методики, использовавшиеся для определения электрофизических параметров карбида кремния до и после облучения электронами и протонами, а также возникающих радиационных дефектов. К таким методикам относятся метод вольт-фарадных характеристик (CV), а также метод релаксационной спектроскопии глубоких уровней (DLTS).

Третья глава посвящена результатам исследований характеристик 4H-SiC JBS диодов, подверженных радиационному облучению, как при комнатной, так и при повышенных температурах, проводились сравнения радиационной стойкости карбида кремния с кремнием. Также в этой главе была предложена качественная модель образования нескольких типов глубоких уровней в карбиде кремния под воздействием облучения, благодаря чему получилось объяснить различия в получаемых концентрациях гальваническим и емкостным методами. Модель хорошо сопоставима с экспериментальными данными сопротивления, как на малых, так и на больших дозах облучения.

В заключении сформулированы основные выводы по полученным результатам.

Не вызывает сомнения, что результаты работы имеют большое значение как для физики полупроводников, так и для дальнейшего изучения радиационных дефектов, оказывающих значительное влияние на характеристики полупроводникового материала.

По содержанию диссертации можно сделать следующие замечания:

1. В главе 3, пункт 3.1 стр 74 описывается конструкция используемого в работе промышленного 4H-SiC интегрального диода Шоттки, носящего наименование JBS-Junction Barrier Schottky, произведенное компанией CREE. На рис 12 приведено схематическое изображение этой конструкции, которая является неполной. Так как под аббревиатурой JBS понимается барьер Шоттки и, сформированный методом ионной имплантации, p-n – переход. Причем, предельная рабочая температура, при которой может эксплуатироваться барьер Шоттки 200°C . Однако рис. 42, 45, приведены DLTS спектры, которые измерялись до температуры 650 К. Требуется разъяснение этих противоречий.

2. Во введении (стр. 5) выражается сожаление, что GaAs по сравнению SiC по своим физико-химическим свойствам не может удовлетворить возросшие требования современной промышленности, что не совсем так. Например, как было указано выше рабочая температура, при которой может эксплуатироваться барьер Шоттки 200°C , в то время как для GaAs диодов на основе p-i-n-структур, полученных методом жидкофазной эпитаксии, она равна 250°C . Выпускают эти приборы промышленно в г. Воронеже.

3. Автор не разу не упоминает, каким образом были определены параметры глубоких центров, энергии ионизации и сечения захвата носителей на ГЦ. Соответственно, отсутствуют зависимости Аррениуса, с помощью которых эти параметры определяются. Отсутствуют их сравнения с литературными данными, что не позволяет корректно идентифицировать ГЦ.

4. В параграфах 3.6.2 представлены DLTS спектры (рис. 45) для JBS при холодном облучении электронами и для двух доз 5×10^{13} (спектр 3) и $1 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (спектр 4). Облучение с этими дозами существенно изменило DLTS спектры. С ростом интенсивности облучения увеличились амплитуды Z1/Z2 пиков, кроме того, DLTS пик смещался в сторону низких температур на $\sim 70 \text{ K}$, при этом он был поименован также как Z1/Z2 пик. Эти изменения невозможно объяснить плохим разрешением двух и более DLTS пиков. Подобный вывод мог возникнуть из-за отсутствия зависимостей Аррениуса этих двух пиков. Скорее всего наблюдаемый эффект может быть связан с проявлением бистабильных свойств дефекта. Для выяснения причин подобных изменений необходимо проведение дополнительных исследований, которые не входят в стандартный набор DLTS спектрометра. Аналогичные метаморфозы наблюдаются в DLTS спектрах, изображенных рис.48 и полученных при повторном измерении, но только в этом случае Z1/Z2 пик смещается в сторону высоких температур.

5. Для рис.48 наблюдается несоответствие между нумерацией спектров на рисунке и в подписях к нему.

Отмеченные недостатки не меняют общей положительной оценки работы.

По нашему мнению, диссертация представляет собой самостоятельное, логически завершенную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научной задачи имеющей значение для понимания механизмов, ответственных за увеличение радиационной стойкости диодов при электронном и протонном облучении при повышении температуры облучения.

Диссертационная работа Давыдовской Клавдии Сергеевны на тему «Влияние температуры облучения на образование радиационных дефектов в карбиде кремния и деградацию приборов на его основе», отвечает всем требованиям предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», а ее автор, Давыдовская К.С., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Соболев Михаил Михайлович
д.ф.-м.н. (специальность 01.04.10
физика полупроводников)

«2» февраля 2024 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
старший научный сотрудник лаборатории диагностики материалов и структур
твердотельной электроники
Адрес: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
Телефон: (812) 297-22-45
e-mail: post@mail.ioffe.ru

Подпись М.М. Соболева удостоверяю

Ученый секретарь

ФТИ им. А.Ф. Иоффе

М.И. Патров