

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы **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

Карбид кремния в настоящее время считается наиболее перспективным материалом для создания приборов силовой и экстремальной электроники. Однако, несмотря на длинную историю совершенствования технологии и исследований этого полупроводника, ряд проблем еще остаются нерешенными. В частности, большую дискуссию вызывает его устойчивость к облучению частицами высоких энергий. В этой связи диссертационная работа К.С. Давыдовской представляется актуальной и своевременной.

Облучение полупроводника высокоэнергетическими частицами, такими как электроны или протоны, приводит к появлению дефектов кристаллической решетки, которые создают глубокие уровни в запрещенной зоне полупроводника. Одним из наиболее эффективных методов, обеспечивающим в том числе количественную характеристику глубоких центров, давно зарекомендовала себя нестационарная емкостная спектроскопия глубоких уровней (DLTS). Поэтому выбор диссертантом ключевого метрологического оборудования для решения поставленных в диссертационной работе задач представляется абсолютно обоснованным.

Радиационная стойкость широкозонного карбида кремния в работе анализировалась в сравнении с традиционным кремнием. Диссертантом показано, что для компенсации базы SiC диода потребуется в 200 раз большая доза облучения, чем для компенсации базы референтного кремниевого диода. Особое внимание было уделено детальному измерению скорости удаления носителей заряда, понимаемому как отношение изменения концентрации носителей вследствие облучения высокоэнергетическими частицами к дозе этого облучения. Малое отличие в скоростях удаления носителей заряда в SiC и Si диодах получило объяснение с точки зрения различной температуры начала отжига первичных радиационных дефектов.

При анализе вольт-амперных характеристик 4H-SiC диодов Шоттки К.С. Давыдовская зарегистрировала катастрофическое (10 порядков) падение величины прямого тока диодов при облучении частицами в условиях комнатной температуры и всего на 4 порядка при высокотемпературном облучении той же дозой. Тем самым показано, что повышенные эксплуатационные температуры приводят к увеличению радиационной стойкости карбида кремния.

Большая экспериментальная работа проведена по DLTS измерениям серии образцов, подвергавшихся облучению высокоэнергетичными электронами и протонами, в том числе в различных температурных условиях. Выполнена расшифровка пиков DLTS и их идентификация с известными глубокими центрами в SiC. Отмечу, что при анализе самих измерений DLTS в широком температурном диапазоне было обнаружено изменение вида спектров. Этому эффекту отжига дефектов в процессе измерений также было дано объяснение.

В теоретическом плане результатом исследовательской работы стало построение качественной четырехуровневой схемы глубоких уровней в запрещенной зоне карбида кремния, ко-

торая вполне адекватно описывает механизмы формирования радиационных дефектов и взаимной компенсации электронов и дырок при разных температурах облучения.

С практической точки зрения итогом проведенной работы является решение задачи повышения радиационной стойкости карбида кремния, имеющей важное значение для развития физики полупроводников и полупроводникового материаловедения.

Есть **замечание** по схеме расположения основных глубоких уровней в запрещенной зоне 4H-SiC (Рис. 12 автореферата). Цитирую с. 22 «Уровень А3 расположен в нижней половине зоны, и энергия его ионизации еще больше, чем энергия ионизации уровня А2». На самом деле оба уровня (А2 и А3) являются акцепторными, и для них под энергией ионизации понимается энергия высвобождения дырки в валентную зону. Эта энергия меньше для уровня А3.

Данное замечание не снижает общую положительную оценку выполненной работы. Представленные результаты прошли успешную апробацию на российских и международных конференциях, а также опубликованы в периодических изданиях, входящих в международные и российские базы данных.

Считаю, что диссертационная работа **К.С. Давыдовской «Влияние температуры облучения на образование радиационных дефектов в карбиде кремния и деградацию приборов на его основе»** соответствует всем требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, а её автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Доктор физико-математических наук, профессор  
кафедры микро- и нанoeлектроники, руководитель  
Ресурсного Центра «Физика твердого тела» Санкт-  
Петербургского государственного электротехни-  
ческого университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова  
(Ленина)  
197022, С.-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5, литера Ф.  
Тел. (812) 234-31-64;  
Эл. почта: [vizubkov@etu.ru](mailto:vizubkov@etu.ru)

Зубков  
Василий Иванович