

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Лошаченко Антона Сергеевича «Взаимодействие водорода с дислокационными сетками сращенных пластин кремния», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Исследованию процессов взаимодействия водорода с различными дефектами в кремнии посвящено огромное количество работ, а водородная пассивация, в свою очередь, уже активно используется в технологии производства элементов солнечных батарей. Однако, несмотря на многолетние исследования, для целого ряда процессов, связанных с взаимодействием водорода с протяжёнными дефектами, отсутствует достоверная физическая информация. В диссертационной работе А.С. Лошаченко был получен ряд абсолютно новых результатов, важных для формирования правильных фундаментальных представлений об этом взаимодействии и сопутствующих ему процессах.

Диссертация состоит из введения и шести глав. Первая и вторая главы являются обзором литературы, посвящённой, соответственно, дислокациям в кремнии (структуре дислокаций и ее электронным состояниям) и взаимодействию водорода с решёткой и дефектами в кремнии (рассматриваются электронные свойства, диффузия, методы детектирования и т.д.). Третья глава посвящена описанию методических вопросов: использованных экспериментальных методик, описанию образцов и методам их приготовления для исследований. Четвертая глава содержит экспериментальные результаты исследований экстракции водорода из приповерхностной области контрольных образцов и образцов с дислокационными сетками. В пятой главе предлагается оригинальная методика для измерения слабых сигналов комбинационного рассеяния света. Благодаря комбинации предложенного подхода, электронной просвечивающей и оптической микроскопий удалось установить положение водорода в окрестности дислокационных сеток. В шестой главе методом DLTS исследуется взаимодействие водорода с электрически активными центрами на дислокационных сетках сращенных пластин кремния.

В работе представлены почти энциклопедические сведения о всевозможных вариантах встраивания водорода в решетку кремния, его взаимодействию с примесями и дислокациями, а также о сопутствующих уровнях в запрещенной зоне. Следует отметить глубокое, в деталях, понимание автором физики дрейфа протонов в электрическом поле

кристалла, что позволило ему управлять профилем распределения концентрации комплексов водород-примесь с помощью RBA-процедуры.

А.С. Лошаченко получен ряд новых научных результатов, среди которых следует отметить следующие:

- 1) выполнено систематическое изучение образцов сращенных пластин кремния, в которых созданы регулярные дислокационные сетки, локализованные параллельно поверхности. Соотношение глубины залегания дислокационных сеток и концентрации примеси в кремнии выбрано таким образом, чтобы на подготовленных образцах оказалось возможным реализовать емкостные методы измерений и получить характеристики низкотемпературного взаимодействия водорода с дислокациями.
- 2) экспериментально подтверждено, что при проведении RBA-процедуры водород из приповерхностной области единым фронтом перемещается вглубь пластины к краю ОПЗ.
- 3) установлено, что дислокационная сетка захватывает большую часть водорода при гидrogenизации и является препятствием для миграции водорода при последующих низкотемпературных отжигах. Определены энергии связи водорода, локализованного в окрестности дислокационной сетки.
- 4) предложена модель потенциального рельефа, объясняющая полученные в работе экспериментальные результаты по миграции водорода в окрестности ядра дислокации.

Практическая ценность работы состоит в том, что полученные результаты могут быть использованы для совершенствования технологического процесса водородной пассивации, а также для улучшения свойств полупроводниковых структур на основе сращенных пластин кремния и других материалов.

Достоверность экспериментальных результатов подтверждается их воспроизводимостью на большом числе образцов, совпадением экспериментальных данных для контрольных образцов с литературными данными, хорошим качественным согласием экспериментальных результатов для структур с дислокационной сеткой с теоретическими предсказаниями и численным моделированием.

Автореферат диссертации в полной мере отражает ее содержание. Результаты докладывались на восьми российских и международных конференциях.

В то же время следует высказать ряд замечаний к рецензируемой работе.

1. На с. 44 приведены формулы (1), являющиеся развитием дифференциального уравнения Фика. Из текста следует, что система состоит из четырех уравнений. Однако в ней фактически отсутствует четвертое уравнение; к тому же третье, как и последнее на этой странице, на самом деле являются просто выражениями для функции, а не уравнениями.



2. На с. 47 автор «исходя из сказанного выше» утверждает, что водород в кремнии является примесью с отрицательной корреляционной энергией. Однако вышеприведенный текст соответствующего параграфа не подводит к такому выводу.
3. На с. 76-77 при определении отсечки на зависимости  $1/C^2(V)$  ошибочно используется термин «интерполяция», такая процедура называется экстраполяцией.
4. На страницах 89-90 проводится вычитание выражений для кинетик экстракции водорода, по этим результатам получена энергия активации (0,9 эВ), которая существенно отличается от известных из литературы энергии диссоциации пар ВН и энергий связи Н на дислокации. Разброс полученных экспериментальных точек весьма велик, а обоснование приведенной погрешности полученного значения отсутствует.
5. Формула для  $S_{DN} - S_{BN}$  на странице 89 неверна, хотя следующее из нее выражение для временного положения максимума правильно.
6. В тексте диссертации имеет место большое количество орфографических ошибок.

Указанные недостатки, конечно, не являются принципиальными и не снижают общего хорошего впечатления от диссертационной работы. Диссертационная работа Лошаченко Антона Сергеевича выполнена на высоком уровне и является законченным научным исследованием, удовлетворяющим всем требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор – А.С. Лошаченко – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

21 мая 2018 г.

Профессор кафедры Микро- и нанoeлектроники,  
доктор физико-математических наук, доцент

Зубков Василий Иванович

Почтовый адрес: 197376, г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Тел. +79216597464

e-mail: [vzubkovspb@mail.ru](mailto:vzubkovspb@mail.ru)

Подпись Зубкова В.  
Начальник отдела



И. А. Кушова