

УДК 621.315.592

В.В. Гудзев, В.Г. Литвинов, М.В. Зубков, А.Я. Клочков

ГЛУБОКИЕ УРОВНИ В ДИОДАХ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ СИЛИЦИДА ПЛАТИНЫ

Представлены результаты исследований спектра дефектов с глубокими уровнями (ГУ) методом релаксационной спектроскопии в диодах Шоттки PtSi/n-Si с различной технологией травли диэлектрика при формировании базовой области n-p-n транзистора в составе тестовой ячейки. Приведен анализ возможной природы глубоких центров.

1. Введение

Дефекты с ГУ в запрещенной зоне полупроводниковых материалов оказывают существенное влияние на электрические и оптические свойства структур микро- и наноэлектроники. ГУ служат центрами безызлучательной рекомбинации в светоизлучающих полупроводниковых приборах, центрами генерации носителей заряда (НЗ). Наличие ГУ в активной области, например в области пространственного заряда (ОПЗ) коллекторного перехода биполярного транзистора, снижает пробивное напряжение перехода [1, 2]. Таким образом, важной является задача контроля спектра дефектов с глубокими уровнями. Дефекты с ГУ могут образовываться в полупроводниковых барьерных структурах во время их синтеза при проведении тех или иных технологических операций.

Технологический процесс можно считать хорошо отработанным в том случае, если он обеспечивает получение полупроводниковых приборов с контролируемым спектром дефектов с ГУ. Во время отработки технологических операций одной из основных задач является установление закономерностей между параметрами ГУ и режимами технологического процесса. Не менее важной является и проблема определения природы глубоких центров (ГЦ), позволяющая устанавливать и исключать источники неконтролируемых примесей и дефектов в ходе той или иной технологической операции. Кроме того, при уменьшении размеров активных областей и переходе к структурам наноэлектроники наличие ГЦ имеет большое значение, так как ГЦ будут определять электрофизические и оптические свойства наноструктур.

Одним из методов изучения ГЦ является релаксационная спектроскопия глубоких уровней (РСГУ), известная также в англоязычном варианте как DLTS [3]. Основное преимущество

РСГУ перед другими методами исследования ГЦ – это наибольшая чувствительность по концентрации ГЦ, которая составляет до $5 \cdot 10^{-6}$ (ND-NA), где ND и NA – концентрации мелких доноров и акцепторов соответственно [4].

Целью данной работы было исследование энергетического спектра дефектов с ГУ в кремниевых барьерных структурах Шоттки, полученных при различных технологиях травли диэлектрика при формировании базовой области планарных n-p-n транзисторов в составе тестовых структур. В результате была установлена взаимосвязь концентрации ГЦ и технологии травли диэлектрика.

2. Образцы и методы исследования

В качестве объекта исследования использовалась специально сконструированная для проведения электрических измерений тестовая ячейка ТЯ-52, структура которой представлена на рисунке 1.

В работе представлены результаты исследования диодов Шоттки (ДШ) в составе тестовой ячейки ТЯ-52. Структуры формировались на кремниевой подложке КДБ-10 (100) с эпитаксиальным слоем КЭФ-4,5 толщиной 10 мкм. Глубина базовой диффузии составляла 3,5 мкм, поверхностное сопротивление -100 Ом/квadrat, глубина эмиттерной диффузии -2,5 мкм. Контактные окна вскрывались в окисле методом жидкостного химического травления (ЖХТ).

Всего было сформировано три группы образцов, отличающихся технологией формирования базовой области тестовых структур. Отличия заключались главным образом в способах подготовки структуры к разгонке примеси бора. Перед разгонкой бора при формировании базы осуществлялось либо травление боросиликатного стекла (БСС) (1-я группа образцов), либо травление БСС и SiO₂ до тонкой окисной пленки толщиной 0,07 мкм (2-я группа образ-

цов), либо стравливание БСС и SiO₂ полностью до кремния (3-я группа образцов).

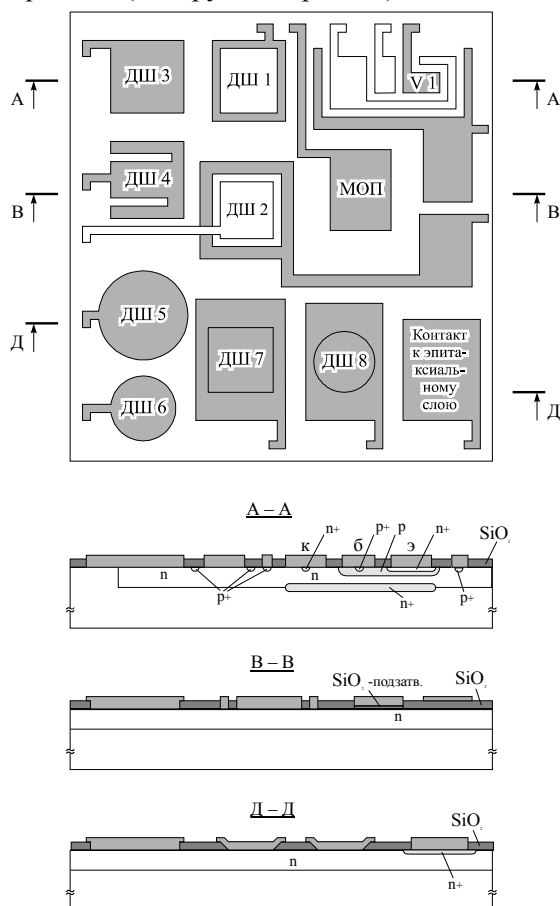


Рисунок 1 – Топология и структура тестовой ячейки ТЯ-52. Разрез А-А соответствует планарной структуре биполярного p-n-p и n-p-n транзистора, разрезы В-В и Д-Д соответствуют диодным структурам Шоттки

Поскольку операция стравливания диэлектрика при формировании базовой области затрагивает приконтактную область диода Шоттки, учитывая возможную диффузию примесей (например, после проведения отжига) и другие побочные эффекты, связанные с возникновением ГЦ, анализ зависимости параметров ГЦ (концентрация, энергия ионизации и сечение захвата) ДШ от технологии базы несомненно представляет интерес.

Площадь контакта Шоттки, сформированного из силицида платины, составляла 1 мм². Омические контакты состояли из трехслойной металлизации. Вначале наносился подслой Ti для качественной адгезии металлизации к полупроводнику, затем подслой W для разделения Al и Ti, что препятствует образованию хрупкого соединения TiAl, толщина Ti-W была 0,2 мкм. И окончательно наносился слой Al толщиной около 0,8 мкм.

Для исследования влияния технологии формирования базовой области на спектр дефектов с ГУ в n-базе ДШ использовался метод РСГУ. Для выяснения пригодности диодных структур Шоттки для исследования методом РСГУ измерялись их вольт-амперные характеристики (ВАХ). ВАХ имели несимметричный вид, характерный для ДШ. Обратный ток утечки составлял не более 1 мкА при комнатной температуре и резко возрастал при повышении температуры, что ограничивало измерение РСГУ-спектров при повышенных температурах.

Таким образом, из измерений ВАХ ДШ с контактами на основе PtSi токовым РСГУ методом не удастся регистрировать спектры из-за чрезмерно высокого уровня тока утечки. Для экспериментов использовали метод РСГУ с компенсацией постоянной составляющей, который описан в работах [4, 5]. Чувствительность РСГУ-спектрометра к концентрации глубоких центров Nt для эпитаксиального слоя КЭФ-4,5 достигает 10¹¹ - 10¹² см⁻³, а максимальная - 10¹⁰ см⁻³ в режиме измерения релаксации емкости.

3. Обсуждение результатов

При проведении измерений РСГУ-спектров следует учитывать и то обстоятельство, что ДШ, как объект исследования обеспечивает максимальную чувствительность измерений к концентрации дефектов с ГУ [3].

РСГУ-спектры измерялись в диапазоне времен релаксации $\tau = 60 - 6000$ мкс. Указанный диапазон τ был выбран на основании ограниченного температурного диапазона измерений 77 - 400 К. Амплитуда импульсов напряжения заполнения U_f и опустошения U_r ГЦ была выбрана +2,5 В и -1,4 В соответственно. Импульс заполнения амплитудой $U_f = +2,5$ В обеспечивал смещение края области пространственного заряда (ОПЗ) в сторону границы раздела PtSi/n-Si и заполнение носителями заряда ГЦ, находящихся в приповерхностной области полупроводника. При меньших U_f РСГУ-спектры получались с амплитудами пиков на уровне шумов. Поскольку амплитуда пиков резко уменьшалась, это указывало на то, что все зарегистрированные ГЦ располагаются главным образом в приповерхностной области полупроводника.

На рисунке 2 представлены РСГУ-спектры одинаковых по структуре, но отличающихся по технологии формирования базовой области ДШ в составе тестовой ячейки ТЯ-52 при $\tau = 1400$ мкс, длительности импульса заполнения $t_f = 200$ мкс. Такая длительность импульса заполнения обеспечивала полное заполнение ГУ носителями заряда, что проявлялось при измерениях РСГУ-спектров как прекращение увеличения амплитуды

ды пиков ГУ при дальнейшем увеличении t_f . По результатам измерений РСГУ-спектров были построены прямые Аррениуса (рисунок 3), и по их углу наклона определены энергии активации обнаруженных ГЦ.

Из рисунка 2 видно, что качественно РСГУ-спектры трех групп образцов похожи, отличия касаются концентрации обнаруженных ГУ $E1$ и $E2$, а также высокотемпературной части спектра. Во всех группах образцов, кроме первой, обнаружено пять ГУ.

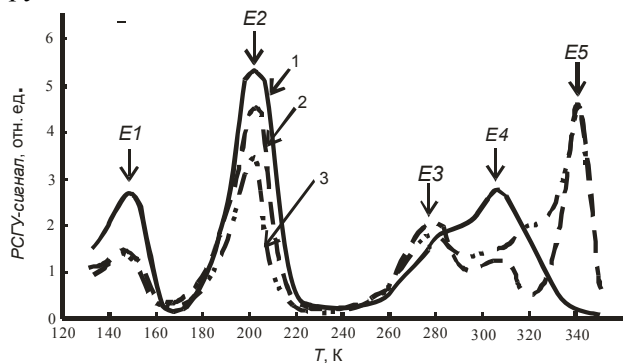


Рисунок 2 – РСГУ-спектры ДШ на основе PtSi/n-Si, полученные при $\tau = 1,4$ мс. Сплошная линия соответствует 1-й группе образцов, пунктирная – 2-й и штрихпунктирная – 3-й

Энергия активации ГУ $E1-E4$ определена из графика Аррениуса (рисунок 3) и составляет соответственно 0,26; 0,38; 0,50; 0,54 эВ. Энергия активации ГУ $E5$ в связи с тем, что этот максимум находился на краю температурного диапазона измерений РСГУ, рассчитывается по формуле $\tau = 2\tau_M \exp(\Delta E_t / kT)$, где τ_M – максвелловское время релаксации, $\Delta E_t = E_c - E_t$ – энергия активации ГУ, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура [4], и составляет 0,60 эВ. Сводные данные по концентрации обнаруженных дефектов с ГУ приведены в таблице. Видно, что в зависимости от технологии формирования базы просматривается тенденция к снижению концентрации ГУ $E4$ на порядок величины при замене травливания БСС полным удалением окисла. Кроме того, остаток окисла 0,07 мкм стимулирует рост концентрации $E4$ приблизительно в 2 раза по сравнению с режимами полного снятия SiO_2 или удаления БСС.

На РСГУ-спектре диодов Шоттки из первой группы, подвергнутых высокотемпературному отжигу, ГУ $E5$ отсутствует. Очевидно, что травливание окисла до кремния либо до остатка 0,07 мкм коррелирует с возникновением ГУ $E5$. Концентрация ГУ $E5$ для ДШ первой и второй групп приблизительно одинакова.

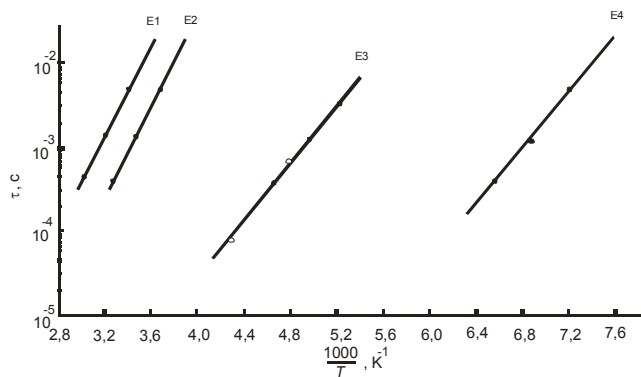


Рисунок 3 – Зависимости Аррениуса

Важно отметить, что после отжига пластины с тестовой ячейкой при 800 °С пик ГУ $E5$ на РСГУ-спектрах полностью исчезал. Авторы работы [6] наблюдали подобную картину для одного из обнаруженных ГУ и связывали этот ГУ с неким “протяженным” по энергетическим состояниям дефектом, который полностью исчезает при отжиге. Среди примесей, образующих ГУ, к $E5$ наиболее приближены по энергии активации ванадий с $E_c - E_t = 0,58$ эВ и хром с $E_c - E_t = 0,57$ эВ [7].

Концентрация и энергия активации ГУ при разных технологиях формирования базы в диодах Шоттки на основе PtSi/n-Si

| ГУ | Энергия активации, эВ | Концентрация ГЦ, см ⁻³ (номер образца) | | |
|---|-----------------------|--|----------------------|----------------------|
| | | (1) | (2) | (3) |
| $E1$ | 0,26±0,02 | 1,5·10 ¹² | 8,8·10 ¹¹ | 7,9·10 ¹¹ |
| $E2$ | 0,38±0,03 | 3,2·10 ¹² | 2,4·10 ¹² | 2,1·10 ¹² |
| $E3$ | 0,50±0,03 | 4,1·10 ¹¹ | 1,1·10 ¹² | 6,3·10 ¹¹ |
| $E4$ | 0,54±0,04 | 1,6·10 ¹² | 3,2·10 ¹¹ | 1,6·10 ¹¹ |
| $E5$ | 0,60±0,04 | – | 2,2·10 ¹² | 1,6·10 ¹¹ |
| Суммарная концентрация ГЦ, см ⁻³ | | 6,7·10 ¹² | 6,9·10 ¹² | 3,8·10 ¹² |

Эксперименты по измерению ВАХ показали значительное уменьшение обратного тока в ДШ третьей группы по сравнению с ДШ первой группы. Это можно связать с соответствующим уменьшением концентрации ГЦ $E4$, который может быть связан с примесями титана или хрома [7]. Уровень $E1$ наиболее близок по параметрам к центру $X1$ [7], который приписывают хрому. ГУ $E2$ в литературе связывают с железом [6, 7]. Центр $E3$ может быть обусловлен примесями серебра, золота либо кобальта [7].

4. Выводы

В работе методом РСГУ были исследованы диоды Шоттки на основе PtSi/n-Si с отличающейся технологией формирования базы. Установлено, что операции полного удаления окисла либо травливания до остатка 0,07 мкм в сочета-

нии с отжигом являются предпочтительнее снятия слоя БСС, т.к. в результате снижается суммарная концентрация ГЦ.

Работа выполнена при поддержке грантами Президента РФ МК-2616.2008.2 и Министерства образования и науки.

Библиографический список

1. *Zu C.* Физика полупроводниковых приборов. Кн.1.-М.: Мир. 1984. 456 с.
2. Кремниевые планарные транзисторы / под ред. Я.А. Федотова.-М.: Сов. радио. 1973. 336 с.
3. *Lang D.V.* Space charge spectroscopy in semiconductors // Thermally stimulated relaxation processes in solids // d. By P.Braunlich: New York : Springer – Verlag. 1979. P.93-133.
4. Резонансный релаксационный спектрометр глубоких уровней / П.Т. Орешкин, Г.С. Дорджин, О.Н. Лактюшкин и др. // Материалы VII Международной конференции по микроэлектронике. 1990. Т. 1.-Минск. -С.287.
5. *Литвинов В.Г., Гудзев В.В., Зубков М.В., Козловский В.И., Лабутин А.В.* Автоматизированный измерительно-аналитический комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней. - Рязань: Рязанский ЦНТИ, информационный листок о НТР № 61-081-02. 2002. 4с.
6. *Benton J.L., Kimerling L.C.* Capacitance transient spectroscopy of trace contamination in silicon // J.Electrochem. Soc. 1982. V.129. N9. P.2098-2102.
7. *Kimerling L.C., Benton J.L., Rubin J.J.* Transition metal impurities in silicon // Defects and Radiation Effects in semiconductors. 1980. 11th Inf. Conf., Oiso, London. 1981. P.217-220.