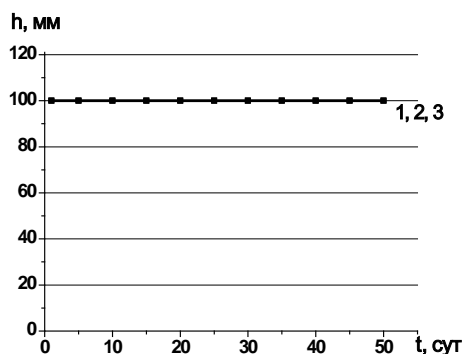


мой в настоящее время суспензии диоксида кремния (Nalco 2358). При этом отмечается хорошее качество поверхности полированных пластин: микроцарапины и царапины на поверхности пластин отсутствуют.



1—концентрация SiO₂ (аэросил А 175) 5,0 мас. %, TiO₂ 1 мас. %; 2—концентрация SiO₂ (аэросил А 90) 4,0 мас. %, TiO₂ 1 мас. %; 3— концентрация SiO₂ (аэросил А 150) 5,0 мас. %, TiO₂ 5 мас. %;

Рисунок 1 – Влияние ПАВ Dispers 715 W (0,2 мас. %) (1), LOPON PO (0,4 мас. %) (2), и М-РУРОL (0,3 мас. %) (3) на седиментационную устойчивость суспензии SiO₂-TiO₂

Скорость съема, достигаемая при использовании состава 4, содержащего аэросил А 175 и аналогичный составу 6 диспергатор, составляет только 0,55 мкм/мин. На поверхности полированных пластин отмечается наличие микроцарапин, а также отдельных царапин, общая длина которых однако не превышает установленных требования. После травления на пластинах отмечается наличие нарушенного

УДК 621. 382

ЭЛЕКТРОПОЛЕВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ

Сопряков В.И., Комлева И.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Наличие примесей и дефектов, образующих в запрещенной зоне полупроводника глубокие энергетические уровни, может приводить ко многим полезным эффектам в материалах и приборах. К ним относятся повышение быстродействия приборов, управление удельным сопротивлением, фотопроводимость, влияние на спектр излучения светодиодов, расширение динамического диапазона мощности излучения у фотоэлектрических полупроводниковых преобразователей с многозарядными примесями.

Значительный прогресс в изучении глубоких центров (ГЦ) внесла релаксационная спектроскопия, использующая емкость р-п-перехода или

слоя: присутствуют риски, микроцарапины (следует отметить, что согласно ТУ (СП 10) нарушенный слой не контролируется). Можно полагать, что появление царапин на поверхности пластин, вероятно, обусловлено более высокой концентрацией диоксида титана в рассматриваемой суспензии по сравнению с другими составами, что позволяет считать концентрацию TiO₂ 0,5 мас. % наиболее приемлемой для изготовления полиабразивных суспензий.

Сопоставление средней скорости процесса полирования суспензиями, содержащими различные ПАВ указывает, что наиболее эффективным диспергирующим и стабилизирующим ПАВ, обеспечивающим наиболее высокую скорость съема является Dispers 715 W и далее LOPON PO. Следует отметить, при использовании суспензии состава 7 нарушенный слой на поверхности пластин после травления отсутствует. Усиление действия адсорбционных процессов в случае использования указанных выше ПАВ ускоряет механические процессы, приводящие к разрушению поверхностных слоев кремниевых пластин, сказываясь на структуре поверхности кристалла и повышая производительность обработки, что и наблюдается в действительности.

Таким образом, наиболее высокие значения производительности процесса полирования (средней скорости съема), хорошее качество поверхности полированных кремниевых пластин и хорошие геометрические параметры обеспечивает полиабразивная суспензия

SiO₂ (аэросил А 150)-TiO₂, содержащая в качестве диспергирующего, стабилизирующего ПАВ Dispers 715 W (таблица 1, состав б).

другой структуры с потенциальным барьером в качестве дозиметра концентрации ГЦ.

Следует учитывать, однако, что энергия активации ГЦ и сечение захвата носителей заряда, определяемые этим методом, зависят от распределения напряженности электрического поля по координате в области пространственного заряда р-п-перехода, что приводит к сложной мультиэкспоненциальной кривой релаксации емкости. Последнее обстоятельство затрудняет интерпретацию экспериментальных данных, однако оно позволяет изучать электрополевые зависимости параметров ГЦ, используя обратное смещение р-п-перехода. Воздействие электрического поля, таким образом, может быть использовано для

модуляции параметров ГЦ, а также для определения их природы.

Для объяснения полевых зависимостей скоростей термической эмиссии носителей заряда из глубоких уровней необходимы данные о поведении потенциала ГЦ в электрическом поле.

Эффект Френкеля заключается в понижении кулоновского потенциального барьера ГЦ приложенным электрическим полем. Понижение потенциального барьера ($\Delta\phi$) и координата максимума потенциала (x_0) даются формулами

$$\Delta\phi = \left(\frac{ze\mathcal{E}}{\pi\epsilon_0\epsilon} \right)^{1/2}, \quad x_0 = \left(\frac{ze}{4\pi\epsilon_0\epsilon\epsilon} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где ze - заряд центра, ϵ - напряженность электрического поля.

Рассмотрим эффект понижения потенциального барьера нейтрального центра во внешнем электрическом поле в дипольном приближении. Упругий дипольный момент нейтрального центра

$$p = \epsilon_0\alpha\epsilon_{лок}, \quad (2)$$

где α - поляризуемость центра, $\epsilon_{лок}$ - локальное поле. Предположим, что локальное поле для неполярных кубических кристаллов определяется добавкой Лоренца к макроскопическому полю в окрестности центра, зависящей только от поляризации атомов основной решетки и не зависящей от свойств примесного центра

$$\epsilon_{лок} = \frac{\epsilon + 2}{3} \epsilon_m. \quad (3)$$

Пусть прямая, соединяющая точечный заряд с центром, совпадает с направлением внешнего поля, а расстояние между центром и точечным зарядом много больше размеров диполя. Тогда напряженность макроскопического поля

$$\epsilon_m = \epsilon_0 - \epsilon_e, \quad (4)$$

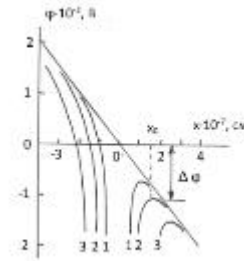
где ϵ_0 - напряженность поля точечного заряда.

Вычисляя дипольный момент (2) и напряженность электрического поля диполя с учетом (3) и (4), найдем зависимость потенциала центра во внешнем поле от расстояния (рис. 1, область $x > 0$)

$$\phi(x) = -\epsilon_{0x} - \frac{\alpha G}{x^4} + \frac{\alpha H \epsilon_0}{x^2}, \quad (5)$$

где $G = \frac{\epsilon + 2}{3} \cdot \frac{\epsilon_0 e}{2(4\pi\epsilon_0\epsilon)^2}, \quad (6)$

$$H = \frac{\epsilon + 2}{3} \cdot \frac{1}{4\pi\epsilon}.$$



$$(\epsilon = 11,7; \epsilon_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ В/см}).$$

$$\text{Значения } x: 1 - 1 \cdot 10^{-21} \text{ см}^3, 2 - 1 \cdot 10^{-20} \text{ см}^3, \\ 3 - 1 \cdot 10^{-19} \text{ см}^3.$$

Рисунок 1 – Зависимость поляризационного потенциала нейтрального центра от расстояния во внешнем электрическом поле

Второе слагаемое в (5) представляет потенциал центра, поляризованного точечным зарядом, а третье учитывает вклад поляризации центра внешним электрическим полем.

Как видно из (5), в области $x > 0$ потенциал имеет максимум, понижение которого увеличивается с ростом поляризуемости (см. рис. 1). Если пренебречь третьим слагаемым в (5), то величины $\Delta\phi$ и x_0 могут быть выражены аналитически.

$$x_0 = (4xG/\epsilon)^{0,2} \quad (7)$$

$$\Delta\phi = -1,25(4xG)^{0,2} \epsilon^{0,8}. \quad (8)$$

В резком p-n-переходе напряженность электрического поля изменяется по линейному закону, а потенциал - по квадратичному. Однако в окрестности центра напряженность электрического поля можно положить постоянной, а зависимость потенциала от расстояния линейной, так что результаты расчета x_0 и $\Delta\phi$ могут быть использованы для анализа опытных данных.

В настоящей работе изучались радиационные дефекты в резких p⁺-n-переходах на базе кремния n-типа с концентрацией $5 \cdot 10^{15} - 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Исследование проводилось методом изотермической релаксации емкости. Измерялось время релаксации заполнения ГЦ (τ), обратное скорости термической эмиссии электронов.

Для объяснения зависимостей $\tau(\epsilon)$ учитывалось не только понижение потенциального барьера центра $\Delta\phi$ в электрическом поле, но и зависимость $x_0(\epsilon)$ для кулоновского (1) и поляризационного потенциала (7). Сечение захвата центра оценивалось, как геометрическое (x_0), величина которого уменьшается коэффициентом, отражающим сложность процесса обмена энергией носителя заряда с решеткой. Такой подход позволил объяснить полевые зависимости скоростей термической эмиссии носителей из кулоновских центров (рис. 2).

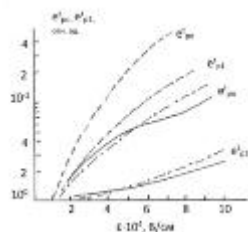
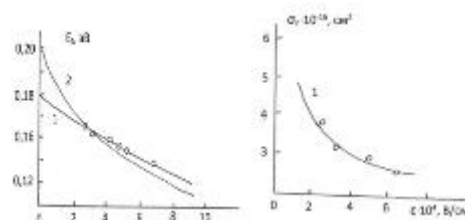


Рисунок 2 – Зависимость скоростей термической эмиссии дырок из нейтрального (e_{p0}^t , $T = 104$ K) и однократно заряженного (e_{p1}^t , $T = 232$ K) центра Zn в Si от напряженности электрического поля

Сплошные линии - эксперимент (данные Германа и Саа), штриховые линии - расчет с учетом $\Delta\phi$, штрих-пунктирные - расчет настоящей работы с учетом $\Delta\phi$ и χ_0

Электрополевые зависимости энергии активации, сечения захвата электрона, а также времени релаксации заполнения А-центра в облуженном кремнии были объяснены на основе модели поляризационного потенциала с учетом $\Delta\phi(\epsilon)$ и $\chi_0(\epsilon)$ при $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-20}$ см⁻³ (рис. 3).

Рисунок 3 – Экспериментальные и расчетные зависимости энергии активации и сечения захвата электронов для А - центра в Si ($T = 77$ K) от напряженности электрического поля



1 - поляризационный потенциал;
2 - кулоновский потенциал.

Экстраполированное значение энергии активации центра в нулевом электрическом поле составило 0,18 эВ, что согласуется с литературными данными.

407