

УДК 621. 382

ЭЛЕКТРОПОЛЕВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ГЛУБОКИХ ЦЕНТРОВ В КРЕМНИИ

Сопряков В.И., Рубин Д.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе рассчитана зависимость поляризационного потенциала нейтрального центра от расстояния во внешнем электрическом поле. Изучены зависимости энергии активации и сечения захвата электронов А-центра в кремнии от напряженности электрического поля. Объяснены зависимости параметров глубоких уровней в кремнии от электрического поля на основе модели поляризационного потенциала. Учитывалось понижение потенциального барьера центров, а также зависимость сечения захвата, как координаты максимума потенциала в электрическом поле.

Ключевые слова: поляризационный потенциал, глубокие центры, энергия активации, сечение захвата, напряженность электрического поля.

DEPENDENCIES OF THE PARAMETERS OF DEEP CENTERS IN SILICON ON THE ELECTRIC FIELD STRENGTH

Soprykov V., Rubin D.

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The dependence of the polarization potential of the neutral center on the distance in the external electric field is calculated in this work. The dependencies of the activation energy and capture cross section of electrons of the A-center in silicon on the electric field strength have been explored. The dependencies of the parameters of deep levels in silicon on the electric field are explained on the basis of the polarization potential model. The decrease in the potential barrier of the centers was taken into account, as well as the dependence of the capture cross section, as the coordinate of the potential maximum in the electric field.

Key words: polarization potential, deep centers, activation energy, capture cross section, electric field strength.

Адрес для переписки: Сопряков В.И., пр. Независимости, 65, Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: vitaivs@mail.ru

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 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

$$\Delta\phi = \left(\frac{ze\varepsilon}{\pi\varepsilon_0\varepsilon}\right)^{1/2}, \quad x_0 = \left(\frac{ze}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon\varepsilon}\right)^{1/2}, \quad (1)$$

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

В полупроводниковых материалах, однако, ГЦ могут обладать поляризационным потенциалом.

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

$$p = \varepsilon_0 \alpha \varepsilon_{\text{лок}}, \quad (2)$$

где α – поляризуемость центра, $\varepsilon_{\text{лок}}$ – 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:

$$\varepsilon_{\text{лок}} = \frac{\varepsilon+2}{3} \varepsilon_M. \quad (3)$$

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

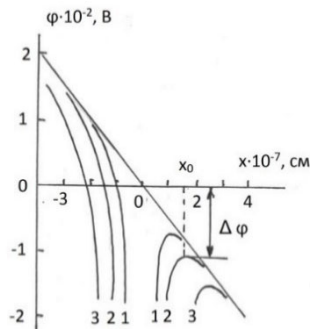
$$\varepsilon_M = \varepsilon_0 - \varepsilon_e, \quad (4)$$

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 $x > 0$)

$$\phi(x) = -\varepsilon_0 x - \frac{\alpha G}{x^4} + \frac{\alpha H \varepsilon_0}{x^2}, \quad (5)$$

где $G = \frac{\varepsilon+2}{3} \cdot \frac{\varepsilon_0 e}{2(4\pi\varepsilon_0\varepsilon)^2}$, $H = \frac{\varepsilon+2}{3} \cdot \frac{1}{4\pi\varepsilon}$.



Значения α : 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 ($\varepsilon = 11,7$; $\varepsilon_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ В/см}$)

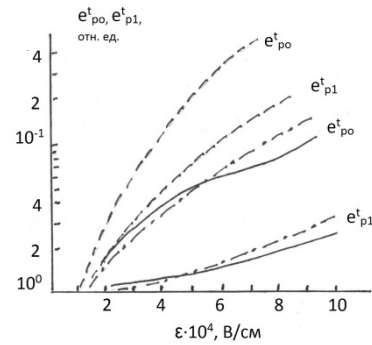
Второе слагаемое в (5) представляет потенциал центра, поляризованного точечным зарядом, а третье учитывает вклад поляризации центра во внешнем электрическом поле.

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.

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

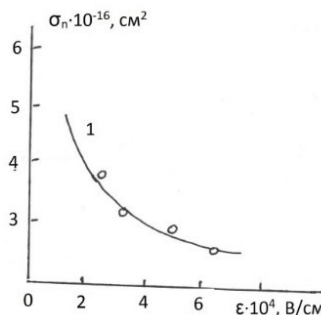
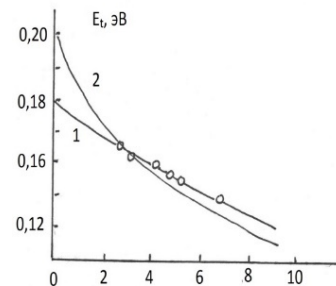
$$\Delta\phi = -1,25(4xG)^{0,2} \varepsilon^{0,8}. \quad (8)$$

В резком р-п-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.



Сплошные линии – эксперимент (данные Германа и Саа); штриховые линии – расчет с учетом $\Delta\phi$, штрих-пунктирные – расчет настоящей работы с учетом $\Delta\phi$ и x_0

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



1 – поляризационный потенциал; 2 – кулоновский потенциал

Рисунок 3 – Экспериментальные и расчетные зависимости энергии активации и сечения захвата электронов для А – центра в Si ($T = 77 \text{ К}$) от напряженности электрического поля

В настоящей работе изучались радиационные дефекты в резких р⁺-п-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).

Электростатические зависимости энергии активации, сечения захвата электрона, а также времени релаксации заполнения А-центра в облученном кремнии были объяснены на основе модели поляризационного потенциала с учетом $\Delta\phi(\epsilon)$ и $x_0(\epsilon)$ при $\alpha = 2,5 \cdot 10^{-20} \text{ см}^{-3}$ (рис. 3). Экстраполированное значение энергии активации центра в нулевом электрическом поле составило 0,18 эВ, что согласуется с литературными данными.

УДК 004.056

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ И ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Глинская Е.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. В наш век данных данные являются наиболее небезопасным и легкодоступным товаром. В такой ситуации искусственный интеллект может оказать огромную помощь индустрии кибербезопасности, тем более что многие киберпреступники уже используют эту технологию. Рассмотрены методы искусственного интеллекта, которые могут оказать большую помощь в области обнаружения злоумышленников в сфере кибербезопасности.

Ключевые слова: искусственный интеллект, машинное обучение, глубокое обучение, кибербезопасность, фишинг.

MACHINE LEARNING AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN INFORMATION SECURITY

Glinskaya E.

*Bauman State Technical University
Moscow, Russian Federation*

Abstract. In this age of data, data is the most insecure and easily accessible commodity. In such a situation, artificial intelligence can be of great help to the cybersecurity industry, especially since many cybercriminals are already using this technology. The methods of artificial intelligence are considered, which can be of great help in the field of detecting intruders in the field of cybersecurity.

Key words: artificial intelligence, machine learning, deep learning, cybersecurity, phishing.

*Адрес для переписки: Глинская Е.В., ул. Вторая Бауманская, 5, Москва 105005, Российская Федерация
e-mail: Glinskaya@bmstu.ru*

В настоящее время много говорят о машинном обучении (МО) и искусственном интеллекте (ИИ). За последние несколько лет эти технологии привлекли внимание специалистов по безопасности, и некоторые из них считают, что ИИ готов трансформировать информационную безопасность.

Искусственный интеллект – это наука о попытках воспроизвести разумное поведение, подобное человеческому. Есть несколько способов добиться этого – машинное обучение – один из них. Например, тип системы искусственного интеллекта, не связанный с машинным обучением,

представляет собой экспертную систему, в которой навыки и процесс принятия решений эксперта фиксируются с помощью ряда правил и эвристик.

Машинное обучение – это особый тип ИИ. Система МО анализирует большой набор данных, классифицирует данные и определяет, какие данные относятся к какой категории. Например, машинное обучение можно использовать для анализа данных о поведении сети и классификации их как нормальных или аномальных.

Учитывая эти определения, все системы машинного обучения также являются системами ИИ. Однако не все системы ИИ используют ма-