

ВЛИЯНИЕ ГЛУБОКИХ УРОВНЕЙ НА ЭФФЕКТЫ ПОЛЯ В ГОМОГЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ

Е. В. Владимирова, В. Н. Гусятников, К. А. Журавлев,
В. А. Иванченко, В. Г. Павлов

Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, 410071, Саратов, Россия

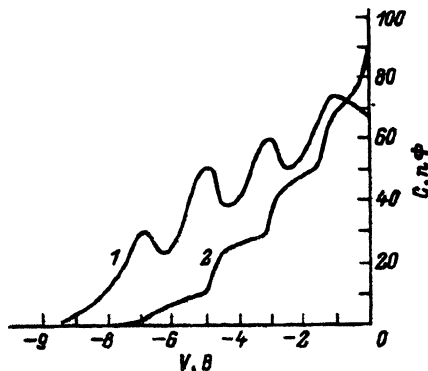
(Получено 9 июня 1992 г. Принято к печати 26 марта 1993 г.)

Известно, что идеальные представления о свойствах какого-либо полупроводникового материала не совпадают с его экспериментальными характеристиками за счет наличия разного рода дефектов, которые находятся в прямой зависимости от режима получения и обработки полупроводника [1-5].

В работе исследовались электрофизические параметры периодических полупроводниковых структур (ППС), изготовленных сублимацией *n*- и *p*-кремния в вакууме 10^{-8} мм рт. ст. ППС были выращены на эпитаксиальных структурах, которые подвергались предварительной обработке: обезжиривание в CCl_4 , химическое травление в 0.05 М растворе CrO_3 в HF [6] с последующей промывкой в дистиллированной воде. Высокотемпературный отжиг проводился при 1200°C в течение 5 мин в вакууме $5 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст. Периодические слои с толщиной 300—500, получались попеременным испарением *n*-Si, легированного фосфором, и *p*-Si, легированного бором, количество слоев варьировалось от 3 до 11. Концентрации примесей в испарителях и толщина слоев подбирались так, чтобы область пространственного заряда (ОПЗ) от обоих *p*-*n*-переходов целиком охватывала низколегированные *p*-слои и общая проводимость структуры была *n*-типа.

На выращенных структурах к последнему *n*-слою, толщина которого равна $2d_n$, формировался выпрямляющий барьер Шоттки электрохимическим осаждением никеля из подогретого до 70°C электролита [7], а тыловой омический контакт создавался к сильно легированной подложке.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) полученных структур при малых смещениях определялись свойствами барьера Шоттки, а при больших — нелинейными свойствами ППС [8]. Измеренные вольт-емкостные характеристики имели особенности — участки с возрастанием емкости на общей спадающей зависимости (рисунок). Было установлено взаимно однозначное соответствие между количеством участков с возрастающей емкостью и *p*-



Экспериментальные C - V -характеристики диода с барьером Шоттки на ППС с $d_n = d_p = 500 \text{ \AA}$, $N_D = N_A = 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\phi_b = 0.55 \text{ эВ}$. 1 — $N_e = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, 2 — $N_e < 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

n -переходов. С увеличением толщины слоев расстояние между участками с возрастающей емкостью на характеристиках увеличивалось.

Наличие участков с возрастающей емкостью на характеристиках можно объяснить на основе модели, учитывающей глубокие уровни в тонких областях p - n -переходов. Когда ОПЗ от барьера Шоттки достигает этих участков, плотность объемного заряда возрастает за счет заряда ионизованных глубоких уровней (ГУ) и емкость увеличивается.

Рассмотрение проводилось на основе численного решения одномерного уравнения Пуассона

$$\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon\epsilon_0} [N_D(x) - N_A(x) + N_e(x) - n(x) + p(x)], \quad (1)$$

где $N_D(x)$, $N_A(x)$ — концентрации мелких доноров и акцепторов;

$$n(x) = \int_0^{\infty} f_n(\epsilon, \varphi(x)) g_n(\epsilon) d\epsilon, \quad p(x) = \int_0^{\infty} f_p(\epsilon, \varphi(x)) g_p(\epsilon) d\epsilon \quad (2)$$

— концентрации свободных электронов и дырок, выраженные через интегралы от их функций распределения f_n, f_p ; $n_g(x)$ — концентрация ионизованных глубоких уровней (для определенности рассматривались глубокие уровни донорного типа). Граничные условия:

$$\varphi(0) = \varphi_b + V, \quad (3)$$

$$\varphi(\infty) = 0, \quad (4)$$

где φ_b — высота потенциального барьера на границе металл-полупроводник, V — приложенное внешнее смещение.

Уравнение (1) решалось с помощью итераций по Ньютону, т. е. решение представлялось в виде $\varphi = \varphi_H + \Delta\varphi$, где φ_H — известное начальное приближение. Затем уравнение линеаризовывалось путем разложения правой части в ряд Тейлора по $\Delta\varphi$ и, после записи в конечных разностях на равномерной сетке по x , решалось относительно добавок $\Delta\varphi_i$ методом прогонки. Счет прекращался, если величина $|\Delta\varphi_i/\varphi_i|$ в каждой i -й точке разбиения становилась меньше ϵ' (при $\epsilon' \sim 10^{-4}$ требовалось обычно 6–10 итераций в зависимости от сложности потенциального рельефа).

Распределение глубоких уровней по координате x $N_e(x)$ также могло задаваться произвольным образом, при этом предполагалось, что они залегают на фиксированной глубине ΔE_g в запрещенной зоне. Для определения числа заряженных глубоких уровней использовалось обычное соотношение для уровней донорного типа [9]

$$N_e(x) = \frac{n(x)}{n(x) + N_c \exp(\Delta E_g/kT)} \quad (5)$$

Суммарный объемный заряд в структуре определялся после нахождения решения (1) $\varphi(x)$ как интеграл

$$Q = |q| \int_0^L [N_D(x) - N_A(x) + N_e(x) - n(x) + p(x)] dx. \quad (6)$$

Для расчета емкости структуры решение уравнения (1) проводилось при двух близких значениях внешнего смещения V_1 и V_2 , после чего емкость определялась следующим образом:

$$C = \frac{dQ}{dV} \approx \frac{Q_1 - Q_2}{V_1 - V_2} \quad (7)$$

Такое рассмотрение соответствует предположению, что глубокие уровни успевают перезарядиться под действием внешнего поля.

Решение уравнения Пуассона с учетом ГУ (N_e) и свободных носителей [$n(x)$ и $p(x)$] (1) показало, что соответствие экспериментальных и расчетных $C-V$ -зависимостей достигается при $N_e \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и, если считать, что ГУ находятся в слоях толщиной $10-50 \text{ \AA}$, расположенных в областях $p-n$ -переходов. Энергетическая глубина залегания ГУ по ширине запрещенной зоны в исследуемых структурах, найденная из спектров отражения структур, снятых на ИК-фурье-спектрометре, составила 0.49 эВ в отсчете от дна зоны проводимости. Проведенные исследования не позволяют однозначно интерпретировать природу этих ГУ, поскольку в процессе формирования самих структур при каждом технологическом воздействии (росте кристалла [1], травлении поверхности полупроводниковой пластины [2], низкотемпературном [4, 5] и высокотемпературном [6] отжигах при выращивании эпитаксиальных слоев и нанесении рабочих контактов) в объеме полупроводника формируются дефекты как единичные, так и ассоциации, которые дают в запрещенной зоне ГУ. Их также могут создавать и атомы железа, внедряемые в структуру в процессе роста вследствие нагрева реакционной камеры.

Рентгенографические исследования выращенных структур подтверждают наличие дефектов. Так, кривые качания от плоскости (220) в режиме скользящих лучей (режим Брегга—Лауэ) от подложки и слоя ППС толщиной 1000 \AA имели разницу в ширине полувысоты пика в 2 раза и протяженные «хвосты» дифракционной картины от слоя ППС.

По мере улучшения вакуума в реакционной камере на $C-V$ -характеристиках наблюдалось понижение высоты участков с возрастанием емкости вплоть до их исчезновения при давлении $10^{-9} \text{ мм рт. ст.}$ Это указывает на уменьшение плотности ГУ с улучшением вакуума. Когда концентрация ГУ становится меньше, чем концентрация свободных носителей в структуре, их роль становится незаметной и в местах захвата ОПЗ обедненной p -области наблюдается резкий спад $C-V$ -зависимости, что соответствует решению уравнения Пуассона без учета ГУ. Включение в ОПЗ обедненных p -слоев дает более резкое, чем при однородном легировании, изменение $C(V)$ как с учетом, так и без учета ГУ.

Таким образом, наличие ГУ в тонких областях $p-n$ -переходов приводит к появлению на $C-V$ -характеристиках участков с возрастанием емкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] С. Н. Горин, Э. А. Зарифьянц, Т. М. Ткачева. Тез. докл. межд. конф. «Свойства и структура дислокации в полупроводниках», 133, М. (1986).
- [2] А. Г. Итальянцев. Тез. докл. VI Всес. конф. по физико-химическим основам легирования полупроводниковых материалов, 143, М. (1988).
- [3] R. Oeder, P. Wagner. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., N 14, 171 (1983).
- [4] G. S. Oehrlein, J. W. Corbett. Mater. Res. Soc. Symp. Proc., N 14, 107 (1983).
- [5] V. M. Babich et al. Phys. St. Sol. (a), N 109, 537 (1988).
- [6] Ota Yusuke. Sol. St. Sci. a. Techn., 127, 1795 (1977).
- [7] Е. В. Владимирова, Н. Г. Зыкова, В. А. Иванченко, Б. Н. Климов. В кн.: Межвуз. науч. сб., № 12, 17 (1986).
- [8] Е. В. Владимирова, В. Н. Гусятников, В. А. Иванченко. Тез. докл. Всес. конф. «Физика и применение контакта металл—полупроводник», 49, Киев (1987).
- [9] А. Милнс. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. (1977).