Эффект Френкеля-Пула в ионизации акцепторов бора в алмазе

Алтухов И.В.¹, Каган М.С.¹, Папроцкий С.К.¹, Хвальковский Н.А.¹, Родионов Н.Б.²,
Большаков А.П.³, Ральченко В.Г.³, Хмельницкий Р.А.⁴

¹ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Россия, 125009, Москва, Моховая, 11-7

² ГНЦ РФ ТРИНИТИ, 142191, Москва, Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12

³ ИОФ им. А.М. Прохорова РАН, Россия, 119991, Москва, ул. Вавилова, 38

⁴ Физический институт им. П.Н. Лебедева, 119333, Москва, Ленинский пр-кт, 53

DOI 10.34077/Semicond2019-59

Исследовался вертикальный транспорт дырок в пленках монокристаллического алмаза с бором, выращенных методом парофазного химического осаждения на сильно легированных бором подложках ($\sim 2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Толщина пленок составляла 10-12 мкм. Омические контакты были изготовлены из сплава Ni-W. Для записи вольтамперных характеристик (ВАХ) использовались прямоугольные импульсы напряжения до $\sim 5 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ длительностью 0,5 - 10 мксек, либо постоянное напряжение. Измерения проведены при комнатной температуре. В слабых полях ВАХ линейна, что позволяет оценить концентрацию p свободных носителей в этом слое и, соответственно, концентрацию N_B нейтральных атомов акцепторной примеси бора: $p \sim 10^8 \text{ см}^{-3}$ и $N_B \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Начиная с полей $\sim 3 \text{ кВ/см}$ наблюдается квадратичная зависимость тока от напряжения, которую мы связываем с линейной зависимостью коэффициента захвата дырок на притягивающие ионы бора от электрического поля [1]. При полях выше $\sim 30 \text{ кВ/см}$ наблюдается экспоненциальный рост тока, вызванный ионизацией атомов бора электрическим полем. Показано, что ионизация вызвана эффектом Френкеля Пула – понижением потенциального барьера примеси во внешнем электрическом поле. Наблюдаются также особенности, связанные с выходом глубоких возбужденных состояний акцепторов в сплошной спектр валентной зоны. Ударная ионизация примеси в нашем случае не наблюдается из-за малой исходной концентрации свободных дырок и большой энергии связи (0,37 эВ) атомов бора.

Зависимость проводимости (концентрации свободных носителей тока) от электрического поля хорошо описывается формулой Френкеля:

$$p \propto \exp \frac{\sqrt{e^3 E / \varepsilon}}{kT}, \quad (1)$$

e – элементарный заряд, E – электрическое поле, ε – диэлектрическая проницаемость, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Работа частично поддержана РФФИ (грант 18-02-01079).

[1] В. Н. Абакумов, И.Н. Крещук, И.Н. Яссиевич // ФТП, 12, 264 (1978); В.Н. Абакумов, В. Карпус, В.И. Перель, И.Н. Яссиевич // ФТП, 22, 264 (1988).