

РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ
В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ И ПЛАЗМЕ

УДК 537.311.322

ЭФФЕКТ ФРЕНКЕЛЯ–ПУЛА ПРИ ИОНИЗАЦИИ
АКЦЕПТОРНОЙ ПРИМЕСИ БОРА В АЛМАЗЕ
В СИЛЬНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

© 2020 г. И. В. Алтухов^а, М. С. Каган^а, С. К. Папроцкий^{а, *}, Н. А. Хвальковский^а,
Н. Б. Родионов^б, А. П. Большаков^с, В. Г. Ральченко^с, Р. А. Хмельницкий^д

^аИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

^бГосударственный научный центр Российской Федерации,
Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований,
ул. Пушкиных, 12, Москва, Троицк, 108840 Российская Федерация

^сИнститут общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
ул. Вавилова, 38, Москва, 119991 Российская Федерация

^дФизический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
Ленинский просп., 53, Москва, 119991 Российская Федерация

*E-mail: s.paprotskiy@gmail.com

Поступила в редакцию 10.01.2020 г.

После доработки 10.01.2020 г.

Принята к публикации 15.02.2020 г.

Исследована проводимость эпитаксиальных алмазных пленок, слабо легированных бором, в сильном электрическом поле вплоть до $\sim 5 \times 10^5$ В/см. Показано, что при комнатной температуре из-за малой концентрации свободных дырок и большой энергии связи бора в алмазе ионизация происходит за счет эффекта Френкеля–Пула.

DOI: 10.31857/S0033849420110029

ВВЕДЕНИЕ

Бор – основная акцепторная примесь в алмазе, которая может сравнительно легко вводиться в большой концентрации. В отличие от германия и кремния, где бор – мелкий акцептор, в алмазе его энергия ионизации ~ 370 мэВ, что сильно затрудняет использование алмаза для прикладных задач электроники [1]. Даже при комнатной температуре только 1...2% атомов бора ионизируются теплом, поэтому проводимость довольно мала. Чтобы увеличить проводимость, нужно либо повышать температуру, либо увеличивать степень легирования, либо прикладывая достаточно сильное электрическое поле. Процессы ионизации примесных атомов бора в алмазе электрическим полем интересны не только для приложений, но и с точки зрения изучения их отличия от аналогичных процессов ионизации водородоподобных акцепторов в классических полупроводниках германий и кремний. В данной работе представлены результаты исследования полевой ионизации акцепторов бора в алмазе.

1. ОБРАЗЦЫ И УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовались номинально нелегированные (*i*-тип) эпитаксиальные алмазные пленки толщиной

10...12 мкм, выращенные методом газофазного химического осаждения на подложках с ориентацией (100), сильно легированных бором ($\sim 2 \times 10^{19}$ см⁻³). Подложки были вырезаны из кристаллов алмаза (*p*⁺-тип), синтезированных методом высокого давления/высокой температуры (НРНТ), и затем отполированы. Поврежденный полировкой поверхностный слой подложки удаляли с помощью последовательности операций: отжиг при 1500°C в течение 1 ч, растворение образовавшегося графита в смеси H₂SO₄ + K₂Cr₂O₇ и травление ионным пучком Ag⁺ с энергией 7 кэВ для удаления оставшегося дефектного слоя алмаза толщиной ~ 4 мкм. Плазмохимический синтез эпитаксиальных алмазных пленок проводили в газоразрядной плазме смеси метана и водорода высокой чистоты, созданной с помощью излучения мощного (до 5 кВт) магнетрона с частотой 2.45 ГГц. Контакты толщиной ~ 35 нм наносили с обеих сторон пластин методом магнетронного напыления. В качестве материала контактов использовали сплав Ni–W, дающий омический контакт. Сечение изготовленной структуры показано схематически на вставке к рис. 1.

Измерялись вольтамперные характеристики (ВАХ). К образцам прикладывали либо постоян-

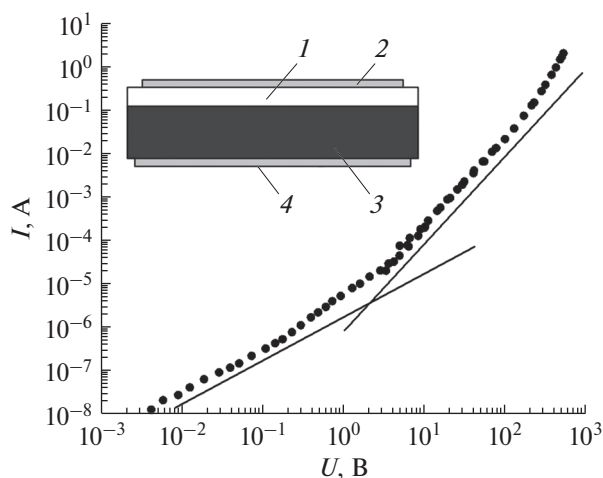


Рис. 1. ВАХ алмаза, легированного бором, при $T = 300$ К. Точки эксперимент, прямые линии – линейная и квадратичная аппроксимации. На вставке – схема структуры в разрезе: 1 – эпитаксиальная пленка алмаза толщиной 10...12 мкм, 2, 4 – металлические контакты толщиной 35 нм, 3 – подложка алмаза, сильно легированного бором, толщиной 300 мкм.

ное напряжение (в линейной области ВАХ), либо треугольные импульсы напряжения с временем нарастания 0.5...100 мкс и частотой повторения 1...100 Гц (во избежание джоулевого нагрева образцов при больших напряжениях). В последнем случае ВАХ восстанавливали из зависимостей напряжения и тока от времени.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведена ВАХ образца с омическими контактами при комнатной температуре в дважды логарифмическом масштабе. 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. Используя величину подвижности дырок ~ 1000 см²/(В с) [2], получаем $p \sim 10^8$ см⁻³ и $N_B \sim 10^{14}$ см⁻³. Начиная с полей ~ 3 кВ/см наблюдается квадратичная зависимость тока от напряжения, которую мы связываем с линейной зависимостью коэффициента захвата дырок на притягивающие ионы бора от электрического поля [3]. Экспериментально аналогичная зависимость наблюдалась, например, при захвате дырок на ионы бора в кремнии [4].

При полях выше ~ 30 В/см наблюдается сильный (экспоненциальный) рост тока, вызванный ионизацией бора. Мы связываем ионизацию примеси в сильном поле с увеличением термоэлектронной эмиссии за счет эффекта Френкеля–Пула – понижения кулоновского потенциала примеси внешним электрическим полем (вставка на рис. 2).

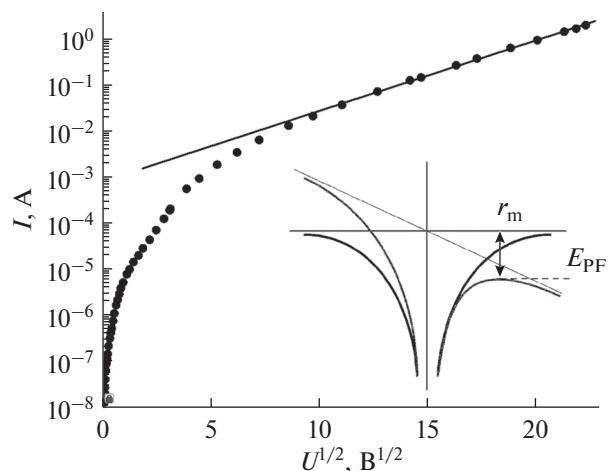


Рис. 2. ВАХ алмаза, легированного бором, демонстрирующая ионизацию по эффекту Френкеля–Пула. На вставке – схема эффекта; E_{PF} – энергия понижения примесного барьера по Френкелю, r_m – положение максимума потенциала.

При этом зависимость концентрации носителей p от приложенного электрического поля E дается формулой Френкеля [5]

$$p \propto \exp\left[\left(\frac{e^3 E}{\epsilon}\right)^{1/2} / kT\right],$$

где e – элементарный заряд, ϵ – диэлектрическая проницаемость, k – постоянная Больцмана, T – температура. На рис. 2 приведена ВАХ образца алмаза при комнатной температуре. Хорошая линейная аппроксимация зависимости $\lg I$ от $U^{1/2}$ при полях $E > 30$ кВ/см подтверждает сделанный вывод. Действительно, при этих полях дрейфовая скорость дырок должна насыщаться и ток $I = ev_0 s$ (v_0 – насыщенная дрейфовая скорость, s – площадь образца) пропорционален концентрации свободных дырок.

В случае ударной ионизации обычно наблюдается появление на ВАХ S-образного участка. S-образность при ударной ионизации водородоподобной примеси связывают с возбужденными состояниями, по которым происходит каскадный захват носителей, ионизованных полем с основного состояния, а поле их ионизации существенно меньше, чем для основного (эта модель предложена в работе [6]). В алмазе, сильно легированном бором, также наблюдалась S-образная ВАХ [7]. Основная особенность ВАХ в нашем случае – отсутствие S-образности. Причиной этого также является эффект Френкеля–Пула. В сильных полях, достаточных для ударной ионизации основного состояния акцептора в алмазе, из-за сильного понижения примесного потенциала уже первое (самое глубокое) возбужденное состояние бора (~ 70 мэВ) оказывается в сплошном спектре валентной зоны, образуя

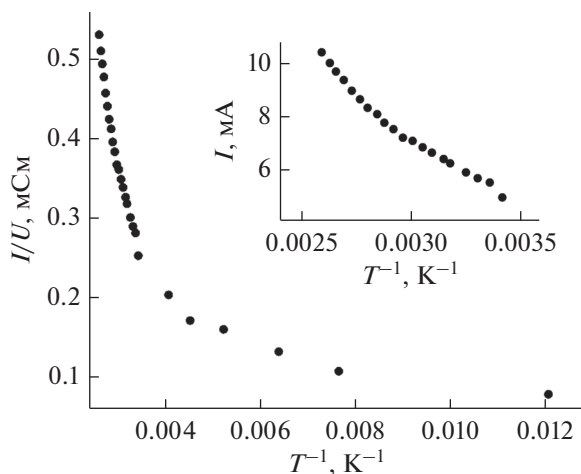


Рис. 3. Температурная зависимость проводимости алмазной пленки толщиной 10 мкм в интервале от температуры жидкого азота до 400 К. На вставке — часть этой зависимости для интервала 300–400 К.

так называемое резонансное (квазилокальное) состояние. Именно поэтому перезарядка примесных уровней, приводящая к появлению S -образности, практически отсутствует.

На рис. 3 приведена температурная зависимость проводимости алмаза с бором в поле 100 кВ/см. При температурах выше комнатной эта зависимость активационная, проводимость σ пропорциональна $\exp(\Delta\epsilon/kT)$ (вставка на рис. 3). Однако энергия активации $\Delta\epsilon$ оказалась значительно меньше ожидаемой. Френкелевское понижение примесного барьера при 100 кВ/см составляет ~ 100 мэВ, поэтому $\Delta\epsilon$ должна уменьшиться до $370 - 100 = 270$ мэВ. Это противоречие может быть объяснено с помощью замены решеточной температуры T на некоторую “эффективную” температуру T^* , вве-

денную в книге [3] (гл. 10) и с учетом разогрева дырок электрическим полем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследован вертикальный транспорт дырок в монокристаллических алмазных пленках, легированных бором, в сильных электрических полях. Оценены концентрации примесей и свободных дырок. Установлено, что при комнатной температуре из-за малой концентрации свободных дырок и большой энергии связи бора в алмазе ионизация происходит за счет эффекта Френкеля–Пула — понижения кулоновского барьера примеси в электрическом поле.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-02-01079).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kalish R. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. № 20. P. 6467.
2. Barjon J., Habka N., Mer C. et al. // Phys. Stat. Sol. Rapid Res. Lett. 2009. V. 3. № 6. P. 202.
3. Abakumov V.N., Perel V.I., Yassievich I.N. Nonradiative Recombination in Semiconductors. Amsterdam: North Holland, 1991.
4. Годик Э.Э., Курицын Ю.А., Синис В.П. // ФТП. 1978. Т. 12. № 2. С. 351.
5. Frenkel J. // Phys. Rev. 1938. V. 54. № 8. P. 647.
6. Kastalskii A.A. // Phys. Stat. Sol. (a). 1973. V. 15. № 2. P. 599.
7. Mortet V., Tremouilles D., Bulir J. et al. // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. № 15. P. 152106.