

Исследование температурной зависимости подвижности основных носителей заряда в легированных широкозонных полупроводниках

Г. Касапиди, И.Д. Емельянов, А.В. Соломникова, В.И. Зубков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: В данной работе проведено исследование температурной зависимости подвижности основных носителей заряда в легированных широкозонных полупроводниках: GaN, 4H-SiC и монокристаллическом алмазе р-типа. Экспериментальные данные, полученные методом Холла в широком диапазоне температур, сопоставлены с результатами теоретического моделирования. Проанализирован парциальный вклад различных механизмов рассеяния: на ионизированных и нейтральных примесях, а также на акустических и оптических фононах. Полученные результаты важны для моделирования мощных и СВЧ приборов на основе исследуемых материалов.

Ключевые слова: подвижность носителей заряда, механизмы рассеяния, эффект Холла, широкозонные полупроводники

1. Введение

Разработка новых высокотехнологичных приборов, таких как силовые MOSFET транзисторы, НЕМТ-транзисторы, а также высоковольтные диоды Шоттки и IGBT-транзисторы, создает потребность в материалах с большей шириной запрещенной зоны, чем в распространенных в промышленности Si и GaAs, так как при создании таких приборов к материалу предъявляются более высокие требования к электрофизическим свойствам.

«Широкозонными» полупроводниками принято считать материалы с шириной запрещенной зоны больше 3 эВ [1]. Они выгодно выделяются на фоне GaAs и Si за счет высокой теплопроводности, высокой подвижности носителей заряда, радиационной стойкости и способности работать в экстремальных условиях [2].

В данной работе рассматриваются три широкозонных полупроводника: гексагональный GaN, 4H-SiC и монокристаллический алмаз. Эти материалы являются наиболее перспективными в индустрии, так как они обладают превосходными показателями эффективности для применения в силовой, СВЧ и экстремальной электронике.

Подвижность, по определению, является характеристикой, отражающей скорость носителя заряда в поле единичной напряженности. Она в большой степени определяет пригодность полупроводникового материала в силовой и СВЧ электронике [2]. В данной работе сравниваются теоретически рассчитанные подвижности носителей заряда легированных широкозонных материалов и экспериментально полученные с помощью метода Холла.

2. Метод Холла. Теоретические основы расчета температурной зависимости подвижности носителей заряда

Холловские измерения являются распространенным электрофизическим методом анализа полупроводниковых структур. Суть метода Холла заключается в регистрации поперечной разности потенциалов, так называемой ЭДС Холла (V_H), возникающей

вследствие действия силы Лоренца в скрещенных электрическом и магнитном полях.

В ходе эксперимента через найденную ЭДС Холла вычисляется коэффициент Холла R_H при постоянных задаваемых токе I и индукции магнитного поля B , а холловская подвижность носителей заряда имеет вид [3]:

$$R_H = \frac{V_H d}{IB}, \quad \mu_H = \frac{R_H}{R_{\square} d} = \frac{\mu}{r_H}, \quad (1)$$

где V_H – ЭДС Холла, R_{\square} – сопротивление квадрата пленки образца, d – толщина образца, r_H – Холловский фактор, а μ – дрейфовая (или омическая) подвижность носителей заряда.

Измерения эффекта Холла проводились с помощью автоматизированной системы измерений DexinMag DX-60. Она состоит из катушки, которая задаёт магнитное поле, измерителя магнитной индукции, источника-измерителя, источника питания катушки и матричного релейного переключателя. Температурные измерения проводились путем помещения образца с контактами в геометрии Ван дер Пау в азотный криостат с температурным контроллером между полюсами электромагнита.

В теоретическом расчете подвижность рассматривается в приближении времени релаксации:

$$\mu = \frac{q \langle \tau \rangle}{m_{\sigma}^*}, \quad (2)$$

здесь q – элементарный заряд, m_{σ}^* – эффективная масса проводимости, $\langle \tau \rangle$ – среднее время релаксации, определяющееся вкладом действующих при конкретной температуре механизмов рассеяния по правилу Маттисена [1].

Парциальный вклад каждого механизма рассеяния рассчитывался по формулам из статьи [4]. Так как в литературе нет ясности относительно корректного определения Холловского фактора r_H [4], на данном этапе исследования его значение бралось за единицу. Таким образом, далее мы сравниваем расчет дрейфовой (омической) подвижности с экспериментальной (холловской).

Вклад различных механизмов рассеяния носителей заряда в суммарную подвижность сильно зависит от температуры. Обычно при низких температурах, пока носители заряда обладают малой кинетической энергией, доминируют механизмы, связанные с дефектами кристаллической решетки (рассеяние на ионизованных и нейтральных атомах примеси, рассеяние на дислокациях), а при высоких T преобладает решеточное рассеяние (оптические и акустические фононы) [1].

3. Результаты

Рассмотрим измеренную температурную зависимость холловской подвижности в GaN:Si, выращенном в АО «Светлана-Рост» (рисунок 1). Структура представляет собой 2 мкм легированного GaN, выращенного на сапфире. Для согласования периода решеток перед ростом GaN были выращены промежуточные эпитаксиальные слои.

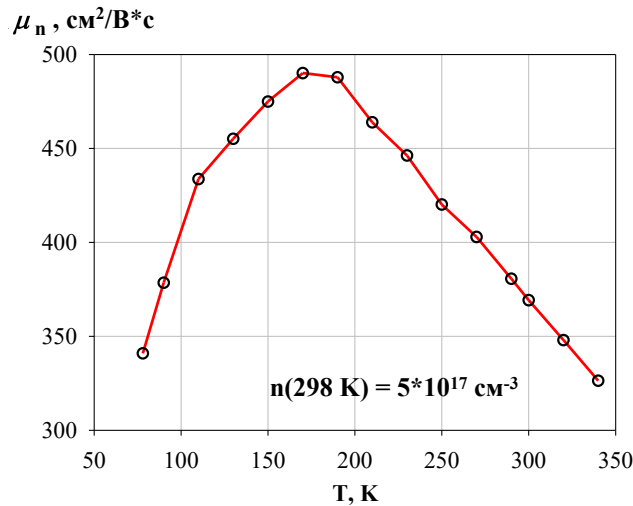


Рисунок 1. Экспериментальная зависимость холловской подвижности электронов от температуры в образце GaN:Si ($n=5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при 300 K).

Форма кривой соответствует теоретически предсказанной и измеренной экспериментально в [5] в случае высокого уровня легирования кремнием ($n=5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при комнатной температуре). При низких T наблюдается рост подвижности вплоть до пика около $480 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ при температуре порядка 200 K, что ниже экспериментально найденного значения в $900 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ в чистом GaN. В этой области доминирует рассеяние на ионизованных атомах примеси и дислокациях, появляющихся при гетероэпитаксии. При температурах более 200 K начинает доминировать механизм рассеяния на оптических фононах. Исследуемый эпитаксиальный слой используется в качестве источника электронов в GaN рHEMT-структуре. Экспериментально полученная подвижность при комнатной температуре около $370 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ является хорошим результатом, так как позволяет обеспечивать низкое сопротивление транзистора в открытом состоянии, повышая эффективность прибора.

Следующим исследованным образцом является подложка из 4H-SiC, легированная азотом, экспериментальная температурная зависимость подвижности для которого представлена на рисунке 2.

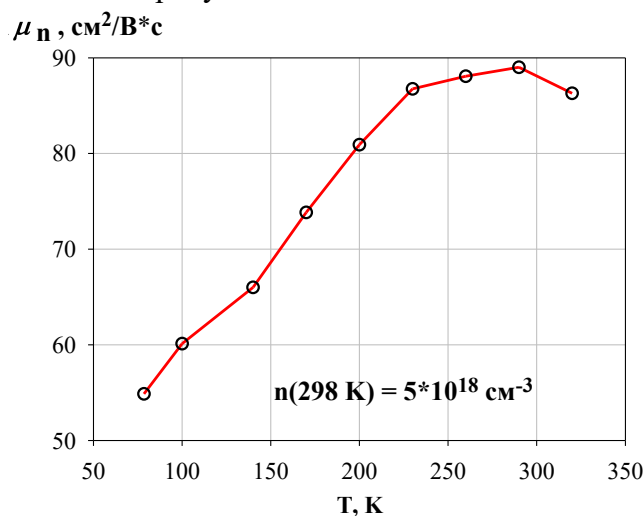


Рисунок 2 Зависимость холловской подвижности электронов от температуры в образце 4H-SiC:N ($n=5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при 300 K).

При комнатной температуре экспериментально измеренная подвижность составляет порядка $90 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Эта величина хорошо сходится с данными,

приведенными в [6] для случая сильнолегированного 4Н-SiC, содержащего большое количество дислокаций. В температурном диапазоне 100-300 К имеет место совместный эффект решеточного и примесного рассеяния носителей заряда. Затем доминирующим механизмом становится рассеяние, связанное с междолинными переходами с участием оптических фононов, и рассеяние на полярных оптических фононах. Смена доминирующего механизма рассеяния для SiC наступает гораздо выше по температуре, чем в GaN, вследствие более высокой энергии оптических фононов [7].

Для пластины монокристаллического алмаза с измеренной методом ИК Фурье спектроскопии концентрацией бора $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ была измерена температурная зависимость холловской подвижности в диапазоне 298-338 К. Стоит отметить, что, в отличие от GaN и 4Н-SiC, для алмаза технологически отработанным считается внедрение именно примеси р-типа (атомов бора с энергией ионизации 0,37 эВ) [8]. Компенсирующим донором является азот ($E_A=1,7 \text{ эВ}$).

Было проведено численное моделирование дрейфовой подвижности дырок в данном образце, которое показало весьма точное совпадение с экспериментом в исследуемом диапазоне температур (рисунок 3). Расчет температурной зависимости дрейфовой подвижности проводился в разработанной в среде Python программе, которая совмещает в себе расчет концентрации основных и неосновных носителей.

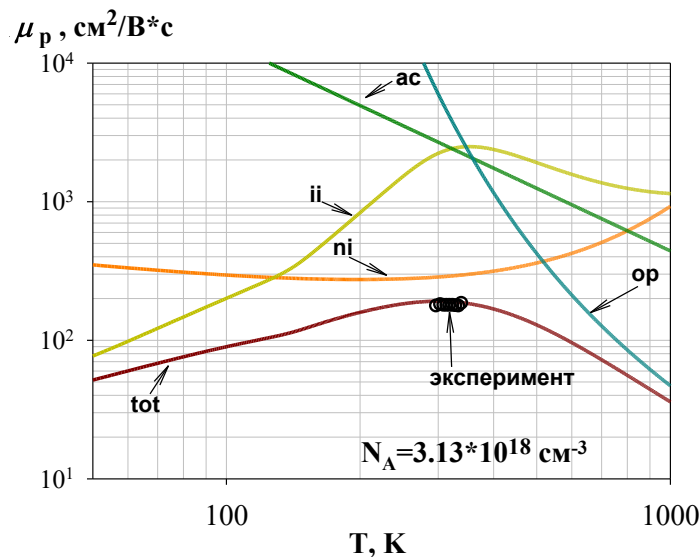


Рисунок 3. Зависимость холловской подвижности дырок от температуры в образце монокристаллического алмаза, легированном бором ($N_A=3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$).

Холловская подвижность дырок в алмазе при комнатной температуре составила порядка $180 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, что при данном уровне легирования является отличным результатом по сравнению с GaN и 4Н-SiC (подвижность дырок в этих материалах, даже чистых, составляет не более $120 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [7]).

Анализируя вклад различных механизмов рассеяния, можно увидеть, что при низких температурах критическим становится рассеяние на ионизованных атомах примеси из-за компенсации атомами доноров [1]. При температурах выше 150 К доминирующим механизмом является рассеяние на нейтральных атомах примеси вследствие малой степени ионизации носителей заряда с глубокой примеси бора в алмазе. Выше 300 К подвижность определяется совместным вкладом рассеяния с участием оптических фононов и рассеяния на нейтральной примеси.

В высокотемпературном диапазоне происходит смена основного механизма рассеяния (*ni* – нейтральная примесь) на другой (*op* – оптические фононы) при 500 К, что гораздо выше чем у GaN и 4Н-SiC (около 250 К и 300 К, соответственно).

Объясняется такое различие более высокой энергией оптических фононов в алмазе (165 мэВ – энергия ТО фонона [4]), чем в GaN и 4H-SiC, вследствие более плотной кристаллической решетки.

3. Заключение

В ходе проведенного исследования были проанализированы температурные зависимости холловской подвижности электронов и дырок для трех ключевых материалов современной микроэлектроники.

Для GaN:Si показано, что при комнатной температуре подвижность электронов составляет порядка $370 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, что является оптимальным для создания структур НЕМТ-транзисторов с низким сопротивлением открытого канала.

В образцах 4H-SiC значительный вклад вносит рассеяние на нейтральных атомах азота при температурах ниже 100 К, что обусловлено относительно высокой энергией активации примеси (0,06–0,12 эВ).

Для монокристаллического алмаза получена высокая холловская подвижность дырок ($180 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ при $3\cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), превышающая показатели GaN и SiC при аналогичных уровнях легирования.

Теоретические расчеты продемонстрировали хорошую сходимость с экспериментом. Подтверждено, что в широкозонных полупроводниках температурный предел доминирования примесного рассеяния носителей заряда напрямую коррелирует с плотностью кристаллической решетки и энергией оптических фононов. Результаты работы могут быть использованы при проектировании приборов, работающих в экстремальных температурных условиях.

Исследование проводилось в рамках **проекта № FSEE-2025-0007 (государственное задание Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00003-25-00 от 25.12.2024)**.

Список литературы

1. Виолина Г. Н., Зубков В. И. Физика полупроводников: Учебное пособие //СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2017.
2. Wellmann P., Ohtani N., Rupp R. (ed.). Wide bandgap semiconductors for power electronics: Materials, devices, applications. – John Wiley & Sons, 2021.
3. Павлов Д.А., Планкина С.М., Кудрин А.В. ЭФФЕКТ ХОЛЛИА: Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2013. – 24 с.
4. Pernot, J., Volpe, P. N., Omnès, F., Muret, P., Mortet, V., Haenen, K., & Teraji, T. (2010). Hall hole mobility in boron-doped homoepitaxial diamond. *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics*, 81(20), 205203.
5. Chin, V. W. L., Tansley, T. L., & Osotchan, T. (1994). Electron mobilities in gallium, indium, and aluminum nitrides. *Journal of Applied Physics*, 75(11), 7365-7372.
6. Hatakeyama, T. Influence of Dislocation Scattering on Electron Mobility in 4H-SiC / T. Hatakeyama, T. Watanabe, K. Shinohe [et al.] // IEEE Transactions on Electron Devices. — 2017. — Vol. 64, no. 6. — P. 2570–2575.
7. NSM Archive : New Semiconductor Materials. Characteristics and Properties // ФТИ им. А. Ф. Иоффе : [сайт]. – URL: ioffe.ru (дата обращения: 25.03.2026).
8. В.И. Зубков, А.В. Соломникова, А.В. Соломонов, А.В. Колядин, J.E. Butler. Характеризация электрофизическими методами монокристаллического алмаза, легированного бором (обзор) (Журнал технической физики 2023, том 93, вып.1).