

ГЛУБОКИЕ ЦЕНТРЫ И СИНЕ-ЗЕЛЕНАЯ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В 4H-SiC

М. М. Аникин, А. А. Лебедев, Н. К. Полетаев, А. М. Стрельчук,
А. Л. Сыркин, В. Е. Челноков

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Россия

(Получена 1 сентября 1993 г. Принята к печати 29 сентября 1993 г.)

Проведено исследование DLTS-спектров и спектров электролюминесценции (ЭЛ) p - n -структур, полученных на основе 4H-SiC сублимационной эпитаксией и ионной имплантацией Al. Обнаружено, что результаты исследования качественно совпадают с результатами, полученными при исследовании 6H-SiC p - n -структур, сформированных аналогичными технологическими методами. Расчеты характеристик ЭЛ 4H-SiC-структур, выполненные исходя из предложенных для 6H-SiC рекомбинационных моделей и параметров, обнаруженных в 4H-SiC глубоких центрах, хорошо согласуются с экспериментом.

Введение

В работах [1, 2] было установлено, что в p - n -структурах на основе 6H, имеющих «борную» ($h\nu_M \sim 2.14$ эВ) электролюминесценцию (ЭЛ), всегда присутствуют D -центры ($E_V + 0.58$ эВ), а в p - n -структурах, имеющих «дефектную» ЭЛ ($h\nu_M \sim 2.35$ эВ), — i -центры ($E_V + 0.52$ эВ). При наличии в p - n -структурах обоих типов ГЦ максимум ЭЛ находился в диапазоне значений 2.14 эВ $\leq h\nu_M \leq 2.35$ эВ и с увеличением плотности прямого тока смещался в коротковолновую область (зависимость $h\nu_M = f(J)$) [3].

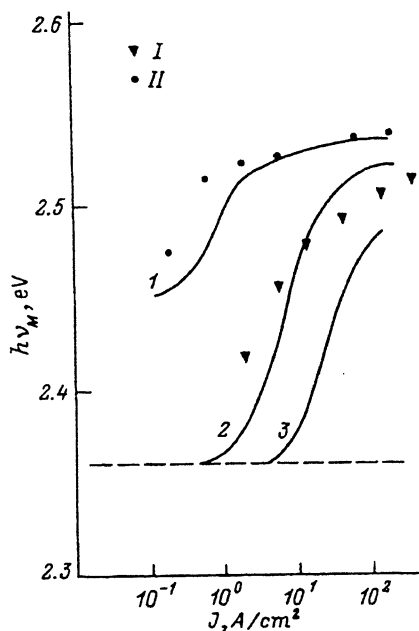
Расчеты зависимостей интенсивности ЭЛ от плотности прямого тока и температуры, а также зависимость $h\nu_M = f(J)$ соответствовали эксперименту, если исходить из предложения, что борная ЭЛ обусловлена излучательной рекомбинацией дырки, захваченной на D -центр, и электрона из зоны проводимости, а дефектная ЭЛ — донорно-акцепторной рекомбинацией уровень азота — i -центр.

Ранее также было обнаружено, что в других поли типах SiC диффузия бора и облучение приводит к появлению борной или дефектной ЭЛ соответственно [4, 5]. При этом положение максимума ЭЛ смещалось относительно 6H-SiC в коротковолновую (в случае более широкозонного поли типа) либо в длинноволновую область спектра (в случае более узкозонного поли типа) на величину, примерно равную разности запрещенных зон данного поли типа и 6H-SiC. Остальные характеристики рассматриваемых ЭЛ в различных поли типах SiC оставались практически одинаковыми.

Образцы

Для проведения исследований был выбран поли тип 4H, который по своим электрофизическим параметрам — меньшая энергия активации донорных

Рис. 1. Зависимость положения максимума спектра ЭЛ от плотности прямого тока. I — СЭ структуры, II — ИЛ структуры. Пунктирные линии — литературные данные для SiC (B) [3]. Сплошные — расчет зависимости $h\nu_M = f(J)$ для СЭ структуры при различных отношениях концентраций i -центров (M_i) и D -центров (M_D), M_i/M_D : 1 — 10, 2 — 1, 3 — 0.1.



примесей, большая подвижность электронов [6] — является более перспективным политипом для создания полупроводниковых приборов, чем 6H-SiC.

Были исследованы диодные структуры, полученные на основе эпитаксиальных пленок n -типа проводимости, выращенных методом сублимационной эпитаксии в открытой системе [7]. p - n -переходы были сформированы либо эпитаксиальным наращиванием p -слоя (СЭ структуры), либо ионной имплантацией Al (ИЛ структуры). Площади меза-структур — $(1-5) \cdot 10^{-3} \text{ см}^2$, концентрация нескомпенсированной донорной примеси в базе — $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3} - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Параметры глубоких центров

Энергия ионизации (E_i), сечения захвата дырок (σ_p) и концентрации определялись методом нестационарной емкости спектроскопии (DLTS) [8]. Сечения захвата электронов (σ_n) определялись из зависимости амплитуды DLTS-пика от времени задержки между импульсом инжекции и импульсом обратного смещения [1]. Ранее при исследовании 4H ИЛ структур был обнаружен аналог i -центра ($E_v + 0.5 \text{ эВ}$, $\sigma_p = 2 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$, $\sigma_n < 1 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$) [9]. Концентрация данных центров была максимальна вблизи металлургической границы p - n -перехода и уменьшалась при удалении в глубь базовой области, что совпадало со свойствами i -центров в 6H-SiC [10]. В 4H СЭ структурах, обладающих голубой ЭЛ ($h\nu_M \sim 2.52 \text{ эВ}$), также были обнаружены i -центры. В СЭ структурах, имеющих при малых плотностях прямого тока (J) максимум ЭЛ в зеленой области спектра, кроме i -центров присутствовали аналоги D -центров ($E_v + 0.54 \text{ эВ}$, $\sigma_p = 3 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, $\sigma_n = 3 \cdot 10^{-21} \text{ см}^2$). С ростом величины J максимум ЭЛ данных структур смещался в синюю область спектра (рис. 1).

Характеристики дефектной электролюминесценции (ДЭЛ)

На рис. 1 представлена зависимость положения максимума ДЭЛ от плотности прямого тока. В области малых значений J (до 10^0 А/см^2) положение максимума ДЭЛ заметно зависит от величины J . При дальнейшем увеличении J смещение максимума ДЭЛ происходит медленнее и составляет $\sim 20 \text{ мэВ}$ при изменении J от 10^0 до $2 \cdot 10^2 \text{ А/см}^2$.

На рис. 2 представлена зависимость интенсивности ДЭЛ от температуры при постоянной плотности прямого тока. Как видно из рисунка, при нагреве от 100 К интенсивность ДЭЛ сначала растет, достигая максимума при $T \sim$

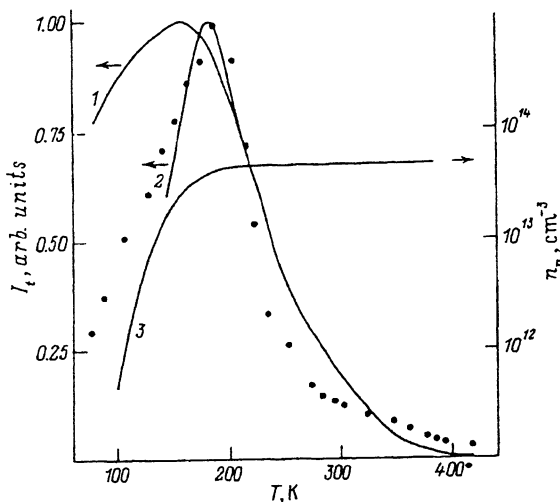


Рис. 2. Зависимость $I_t = f(T)$ для 4H ИЛ структуры. Точки — эксперимент. Сплошные линии — расчет: 1 — без учета температурной зависимости L_p , 2 — с учетом, 3 — расчет зависимости $n_n = f(T)$ для ИЛ структуры.

~ 200 К, а затем падает и составляет при $T = 400$ К 2—3% от интенсивности в максимуме.

На рис. 3 представлена зависимость интенсивности ДЭЛ от плотности прямого тока в ИЛ структурах [$I_t = f(J)$]. Зависимость $I_t = f(J)$ до величин $J \leq 5 \cdot 10^{-1}$ А/см² имела вид $I_t = J^n$, где $n \sim 1.2$; затем становилась сублинейной.

Было проведено исследование постоянной времени затухания ДЭЛ после прекращения импульса инжекции. Было обнаружено, что процесс затухания носит неэкспоненциальный характер, а среднее значение времени затухания (τ_3) ~ 100 мкс. Положение максимума спектров ДЭЛ, регистрируемых через

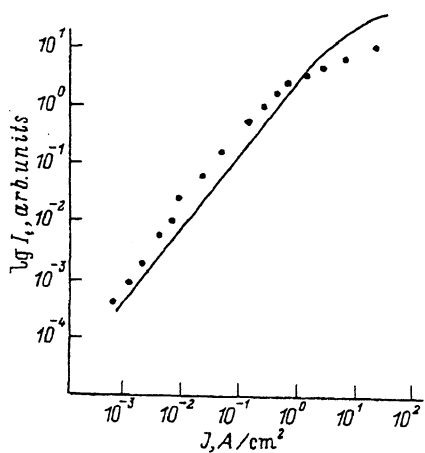


Рис. 3. Зависимость $I_t = f(J)$ для ИЛ структур. Сплошная линия — расчет. (Совмещение кривых при $J = 10^0$ А/см²).

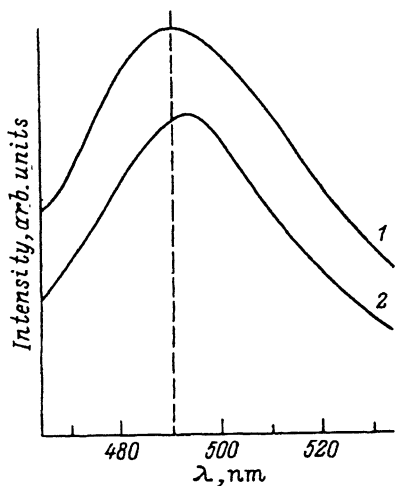


Рис. 4. Спектры ЭЛ ИЛ структур, зарегистрированные: 1 — во время импульса инжекции, 2 — через 50 нс после окончания импульса инжекции.

различные промежутки времени (t_1), после окончания импульса инжекции с увеличением t_1 смещалось в длинноволновую область спектра (рис. 4).

Обсуждение результатов

Как показали проведенные исследования, характеристики ДЭЛ в 4H-SiC качественно аналогичны характеристикам ДЭЛ в 6H-SiC. Кроме того, наличие ДЭЛ также однозначно связано с наличием в данных $p-n$ -структурах аналогов i -центра. Таким образом, приведенные в [2] обоснования для выбора рекомбинационной модели ДЭЛ в 6H-SiC будут полностью справедливы и для 4H-SiC, т. е. при расчетах мы будем полагать, что ДЭЛ в 4H-SiC обусловлена рекомбинацией на донорно-акцепторных парах уровень азота— i -центр и описывается полученной в [2] формулой

$$I_t = SL_p M \int_0^1 \frac{\alpha_p \Delta p (\Delta p y + n_n) dy}{k + \sqrt{k^2 - 4\lambda (n_n + \Delta p y) \Delta p y}}, \quad (1)$$

$$k = [n_n + \Delta p y (\lambda + 1) + \tau_3 \alpha_p (n_n + \Delta p y + \beta_n) (\beta_p + \Delta p)],$$

$$y = e^{-x/L_p}; \quad \lambda = \alpha_p/\alpha_n; \quad \beta_n = N_c e^{-E_d/kT}; \quad \beta_p = N_v e^{E_a/kT},$$

где S — площадь $p-n$ -перехода; $\alpha_p = \sigma_p \cdot v_T$; $\alpha_n = \sigma_n \cdot v_T$; x — расстояние от металлургической границы $p-n$ -перехода в глубь базовой области; L_p — диффузионная длина дырок в n -базе; M — концентрация донорно-акцепторных пар; v_T — тепловая скорость носителей; $N_{c(v)}$ — плотность состояний в $c(v)$ -зоне; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; $E_{a(d)}$ — энергия ионизации акцепторного (донорного) уровня; n_n — равновесная концентрация электронов в базе; Δp — концентрация инжектированных дырок в базе у границы слоя объемного заряда $p-n$ -перехода. Расчет зависимости $I_t = f(\Delta p)$, полученный по формуле (1) с учетом определенных параметров i -центра и литературных данных о электрофизических свойствах 4H-SiC [6, 11] (величина λ принималась равной 10^{-4}), представлен на рис. 5.

Поскольку в ИЛ структурах, с одной стороны, вблизи металлургической границы $p-n$ -перехода имеется сильно компенсированная область протяженностью ~ 0.5 мкм (т. е. в 2 и более раз больше величины L_p), а с другой — концентрация центров максимальна именно в этой области [9, 10], очевидно, что основная излучательная рекомбинация будет происходить вблизи металлургической границы $p-n$ -перехода. Поэтому при расчете зависимости $n_n = f(T)$ мы учитывали сильную компенсацию базы (рис. 2, кривая 3).

Необходима для сопоставления эксперимента и расчета зависимость концентрации инжектированных носителей от плотности прямого тока $\Delta p = f(J)$ получена по методике, описанной в [1], и представлена на рис. 6.

На рис. 2 представлена расчетная зависимость $I_t = f(T)$. Лучшее соответствие расчета и эксперимента было получено при учете температурной зависимости диффузионной длины дырок, которую в данной области температур, как предполагалось, определяет температурная зависимость подвижности $\mu_p = f(T)$. Из-за отсутствия в известной нам литературе зависимости $\mu_p = f(T)$ для 4H-SiC мы использовали аналогичную зависимость для 6H-SiC [12]. Начальный рост зависимости $I_t = f(T)$ объясняется ростом L_p и ростом вероятности захвата электронов на уровне $\alpha_{p(n)} \sim T^{1/2}$. Последующий спад — увеличением вероятности термической ионизации более мелкого донорного уровня.

Обнаруженная в 4H-SiC ЭС структурах зависимость $h\nu_M = f(J)$ была полностью идентична подобной зависимости в 6H СЭ структурах. В [3] зависимость

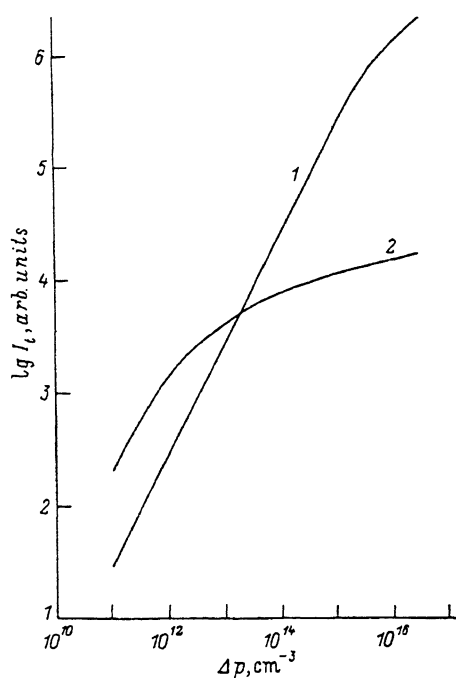


Рис. 5. Расчеты зависимостей $I_t = f(\Delta p)$ для дефектной (1) и борной (2) ЭЛ в 4H-SiC СЭ структурах.

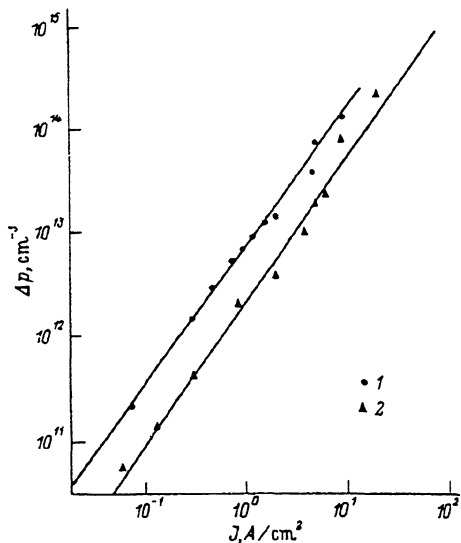


Рис. 6. Зависимости $\Delta p = f(J)$: 1 — ИЛ структуры, 2 — СЭ структуры.

$h\nu_M = f(J)$ для 6H-SiC объяснялась наличием в СЭ структурах двух каналов для излучательной рекомбинации (борной и дефектной ЭЛ), интенсивности которых по-разному зависели от плотности прямого тока J (концентрации инжектированных носителей). Поэтому наблюдаемый спектр являлся суперпозицией двух сигналов и положение его максимума зависело от суммы их интенсивностей в каждой точке спектра (т. е. величины J). Аналогично [3] был выполнен расчет зависимости $h\nu_M = f(J)$ для 4H-SiC. Для этого интенсивность каждой составляющей при различных длинах волн определялась умножением нормированного спектра на амплитудное значение I_t , соответствующее данной величине $\Delta p(J)$. Окончательное положение максимума спектра определялось суммированием обеих составляющих. Зависимость $I_t = f(\Delta p)$ для борной ЭЛ была рассчитана по формуле, полученной в [1] с использованием параметров D-центра в 4H-SiC. В качестве нормировочного спектра для ДЭЛ использовался спектр ЭЛ 4H ИЛ структуры при $J = 3 \cdot 10^0$ А/см², а для борной ЭЛ — спектр образцов 4H-SiC(B) из [5]. Результаты расчета представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, смещение максимума спектра ЭЛ ИЛ структуры в область малых токов можно объяснить наличием фоновой концентрации бора (менее 10% от концентрации пар азот—i-центр) в данных структурах.

Заключение

Как показали проведенные исследования, характеристики ДЭЛ в 4H-SiC полностью совпадают с аналогичными характеристиками ДЭЛ в 6H-SiC, а наличие ДЭЛ однозначно соответствует наличию в p-n-структурах i-центров.

Расчеты характеристик ДЭЛ, выполненные на основе донорно-акцепторной рекомбинационной модели (азот—*i*-центр), находятся в хорошем соответствии с экспериментом, что подтверждает тождественность свойств ГЦ в различных политипах SiC.

Работа выполнена при поддержке Министерства обороны США.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] М. М. Аникин, Н. И. Кузнецов, А. А. Лебедев, А. М. Стрельчук, А. Л. Сыркин. ФТН, 24, 1384.
- [2] А. Н. Андреев, М. М. Аникин, А. А. Лебедев, Н. К. Полетаев, А. М. Стрельчук, А. Л. Сыркин, В. Е. Челноков. ФТП (в печати).
- [3] М. М. Аникин, Н. И. Кузнецов, А. А. Лебедев, Н. К. Полетаев, А. М. Стрельчук, А. Л. Сыркин, В. Е. Челноков. ФТП, 4 (1993).
- [4] В. В. Макаров. ФТТ, 9, 596 (1967).
- [5] Р. М. Поттер. В кн.: Карбид кремния (под ред. Г. Хениша и Р. Роя), 180. Москва: Мир (1972).
- [6] Ю. А. Водаков, Г. А. Ломакина, В. Г. Мохов, В. Г. Одинг, В. В. Семенов, В. И. Соколов. В сб.: Проблемы физики и технологии широкозонных полупроводников, 164. Л. (1980).
- [7] М. М. Anikin, P. A. Ivanov, A. A. Lebedev, S. N. Pyatko, A. M. Strelchuk, A. L. Syrkin. In: Semiconductor Interfaus and Microstructures (ed. by Z. C. Feng), 280. World Scientific (1992).
- [8] D. V. Lang. J. Appl. Phys., 45, 3023 (1974).
- [9] М. М. Аникин, А. А. Лебедев, А. А. Лебедев, А. Л. Сыркин, А. В. Суворов. ФТП, 20, 2169 (1986).
- [10] М. М. Аникин, А. А. Лебедев, А. Л. Сыркин, А. В. Суворов. ФТП, 19, 114 (1985).
- [11] W. Münch. Landolt-Böörnstein, 17a, 132 (1982).
- [12] H. J. van Daal, W. F. Knippenberg, J. D. Wassckk. J. Phys. Chem. Sol., 24, 109 (1963).

Редактор В. В. Чалдышев
