

Описание измеренных импульсных вольт-амперных характеристик р-і-п диода с помощью модели, учитывающей саморазогрев прибора

Я.Б. Мартынов, А.С. Ребров, А.В. Крутов, Е.В. Бувайлик

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: найдены зависимости времен жизни носителей от температуры решетки, необходимые для описания импульсных вольт-амперных характеристик р-і-п диода с высокой точностью.

Ключевые слова: импульсные ВАХ, р-і-п диод, численное моделирование, квазигидродинамическая модель.

Арсенид-галлиевые р-і-п диоды находят широкое применение в СВЧ микросхемах. Часто они используются как переключатели для контроля высокочастотных сигналов или защиты цепей от электрических перегрузок. Важной характеристикой этих устройств является максимальный ток, пропускаемый диодом при прямом включении. Важными особенностями вольт-амперных характеристик (ВАХ) изготовленных р-і-п диодов с тонкой (0.2 мкм) анодной р-областью являются близкий к линейному участок при небольших прямых напряжениях на диоде и наличие участка насыщения при достаточно больших напряжениях на диоде. Принято связывать эти явления с разогревом всей структуры протекающим током. Проведенное моделирование прибора с помощью численного решения двумерных уравнений движения носителей тока в квазигидродинамическом приближении [1] показало, что для объяснения всех особенностей ВАХ диода необходимо учитывать не только саморазогрев прибора, но также необходимо предположить специальную зависимость времен жизни носителей тока от температуры решетки.

Разогрев решетки рассчитывался с помощью численного решения двумерных нелинейных уравнений теплопроводности. Источником тепла был ток, протекающий по структуре диода. Найденная температура полупроводниковой решетки оказывала влияние на кинетические коэффициенты уравнений переноса носителей тока (электронов и дырок) в каждой точке структуры. Расчет проводился самосогласованным образом. При этом предполагалось, что время реакции электронно-дырочной части системы гораздо меньше чем время тепловой реакции.

Известно, что эффективное время жизни носителей тока в полупроводнике (τ) зависит от τ_{n0}, τ_{p0} - минимальных времен жизни неосновных носителей тока в полупроводнике р- типа и п- типа соответственно, а также от положения квазиуровней Ферми. Согласно теории Шокли-Рида-Холла [2-6], скорость рекомбинации U :

$$U = \frac{np - n_i^2}{\tau_{p0} \left[n + n_i \exp\left(\frac{E_t - E_F}{kT}\right) \right] + \tau_{n0} \left[p + n_i \exp\left(-\frac{E_t - E_F}{kT}\right) \right]} \quad (1)$$

где n, p - концентрации электронов и дырок, n_i - концентрация носителей в собственном полупроводнике, E_F - уровень Ферми, E_t - уровень ловушек, k - постоянная Больцмана, T - температура полупроводника,

$$\tau_{n0} = \frac{1}{\sigma_n v_{thn} N_t}, \tau_{p0} = \frac{1}{\sigma_p v_{thp} N_t} \quad (2)$$

σ_n, σ_p - сечения захвата электрона и дырки на ловушечный уровень, N_t - концентрация ловушек, $v_{thn} = \sqrt{3kT/m_n^*}$, $v_{thp} = \sqrt{3kT/m_p^*}$ - тепловые скорости электронов и дырок. Если уровней ловушек с разной энергией несколько, то скорости рекомбинации через эти уровни (1) должны складываться.

Если, как у нас, $n \approx p \gg n_i$ и при этом все уровни ловушек лежат вблизи середины запрещенной зоны ($E_{tj} \approx E_F$), то (1) можно переписать в виде:

$$U = \frac{n}{\tau} \quad (3)$$

где $1/\tau = \sum_j 1/(\tau_{p0j} + \tau_{n0j})$, j - нумерует уровни ловушек с разной энергией. Таким образом, зависимость τ от температуры возникает из-за наличия v_{th} в знаменателях (2), а также из-за зависимости сечений захвата σ_{nj}, σ_{pj} - от температуры. Используемые в расчёте параметры некоторых известных ловушек приведены в таблице 1. Проведенное моделирование показало, что для количественного совпадения рассчитанных и измеренных ВАХ р-і-п диода (рис.1), необходимо, чтобы концентрации N_t ловушек также зависели от температуры (рис.2).

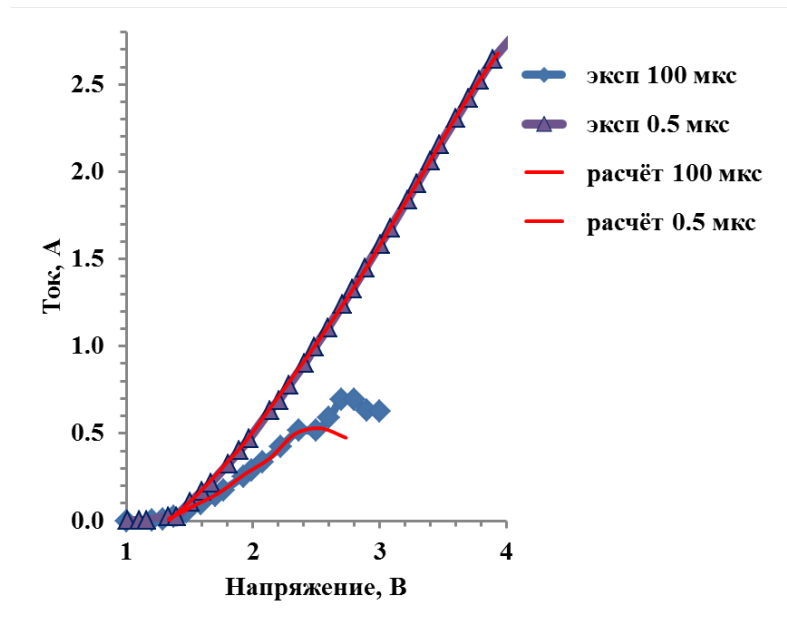


Рисунок 1. Измеренная и рассчитанная импульсные (0.5 мкс) ВАХ р-і-п диода.

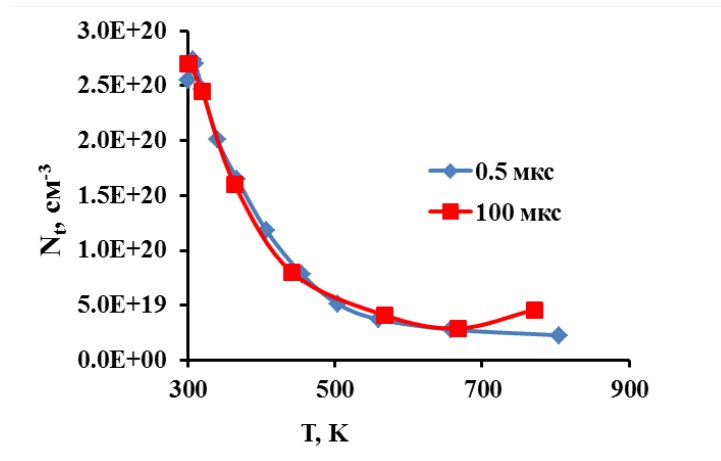


Рисунок 2. Зависимость концентрации ловушек для уровня HL1 от температуры решетки, обеспечивающая количественное совпадение измеренных и рассчитанных импульсных (0.5 мкс) ВАХ p-i-n диода.

Таблица 1. Параметры некоторых ловушек, использованных при расчёте ВАХ p-i-n диода

Ловушка	Диапазон температур (°К)	Сечение захвата электронов (см ²)	Сечение захвата дырок (см ²)	Материал	Энергия активации эВ при 0 К	Ссылка
EL2	50 – 273	$\sigma_n = 6 \cdot 10^{-15} \exp\left(\frac{-0.066}{kT}\right)$		Undoped n-type VPE	$E_c - 0.82$	[2]
	320		$\sigma_p = 2 \cdot 10^{-18}$			
HL1 (chromium)	23—390	$\sigma_n = 6 \cdot 10^{-17} \exp\left(\frac{-0.115}{kT}\right)$		n-type LPE	$E_v + 0.89$	[3]
	150-370		$\sigma_p = 5 \cdot 10^{-17}$	p-type LPE		
EL11	100	$\sigma_n = 2 \cdot 10^{-15}$		Undoped n-type VPE	$E_c - 0.17$	[2]

Список литературы

1. Мартынов Я.Б. Специальный вид граничных условий для системы уравнений низкотемпературной полупроводниковой плазмы./ Я.Б. Мартынов// ЖВМ и МФ —1999. — №2. —С. 309-314.
2. Martin, G. M., Mitonneau, A., Mircea, A., Electron. Lett. 13 (1977) 191.
3. Mitonneau, A., Martin, G. M., Mircea, A., Electron. Lett. 13 (1977) 666.