

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

Балабаев С.И., Домрачев П.Г.

Научный руководитель – профессор Богатов Н.М.

Кубанский государственный университет

В современном процессе обучения используются лабораторный и виртуальный практикумы. Полное понимание тех или иных процессов достигается тогда, когда эти методы дополняют друг друга. Виртуальный практикум, во-первых, полезен для подготовки студентов к выполнению физического практикума, во-вторых, необходим для решения задач, которые невозможно выполнить в рамках физического практикума. На основе полученного виртуального представления о каком либо процессе лучше усваиваются теоретические знания о изучаемом явлении и легче вырабатываются практические, исследовательские навыки. Целью работы является создание виртуального практикума по изучению характеристик полупроводниковых структур.

Программа разделена на три подпрограммы, в каждой из которых выполняется расчет определенного физического явления. В первой подпрограмме выполняется расчет и построение вольтамперной характеристики (ВАХ) на основе теоретических и реальных параметров p - n перехода. Во второй подпрограмме представлена возможность наблюдения зависимости нарастания и спада фотопроводимости от времени жизни неравновесных носителей заряда и времени светового импульса. В третьей подпрограмме рассчитывается зависимость времени жизни неосновных носителей заряда от температуры при условии равенства неравновесной концентрации электронов и дырок $\Delta n = \Delta p$.

Для создания электронно-дырочного перехода в полупроводник вводятся как донорная, так и акцепторная примеси. При этом одна часть структуры содержит доноры и обладает электронным типом проводимости, а другая часть содержит акцепторы и обладает дырочным типом проводимости. В некоторой области кристалла происходит смена типа проводимости с электронной на дырочную. Область перехода между материалами с электропроводностью n - и p -типа называется n - p переходом. В результате полупроводник условно можно разделить на три области: область электронной электропроводности, область дырочной электропроводности и область пространственного заряда. Область пространственного заряда разделяет области электронной и дырочной электропроводности. Вклад в темновой ток насыщения I_0 вносят области электронной и дырочной электропроводности, а вклад в рекомбинационный ток I_r вносит область пространственного заряда. Эквивалентная схема такого p - n перехода показана на рис.1.

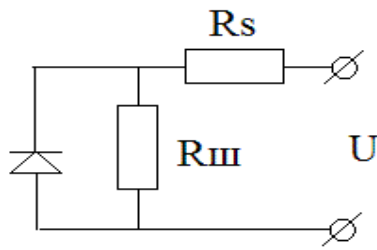


Рис. 1 Эквивалентная схема $p-n$ перехода

Формула расчета ВАХ $p-n$ перехода на основе пяти параметрической модели:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{e(U-IR_s)}{kT}} - 1 \right) + I_r \left(e^{\frac{e(U-IR_s)}{akT}} - 1 \right) + \frac{U - IR_s}{R_{ш}}$$

где, I_0 – темновой ток насыщения, I_r – рекомбинационный ток, U – приложенный напряжение на контактах, R_s – последовательное сопротивление структуры, $R_{ш}$ – сопротивление, шунтирующее $p-n$ переход, a – коэффициент неидеальности $p-n$ перехода.

Рабочее окно подпрограммы ВАХ $p-n$ перехода показано на рис.2.

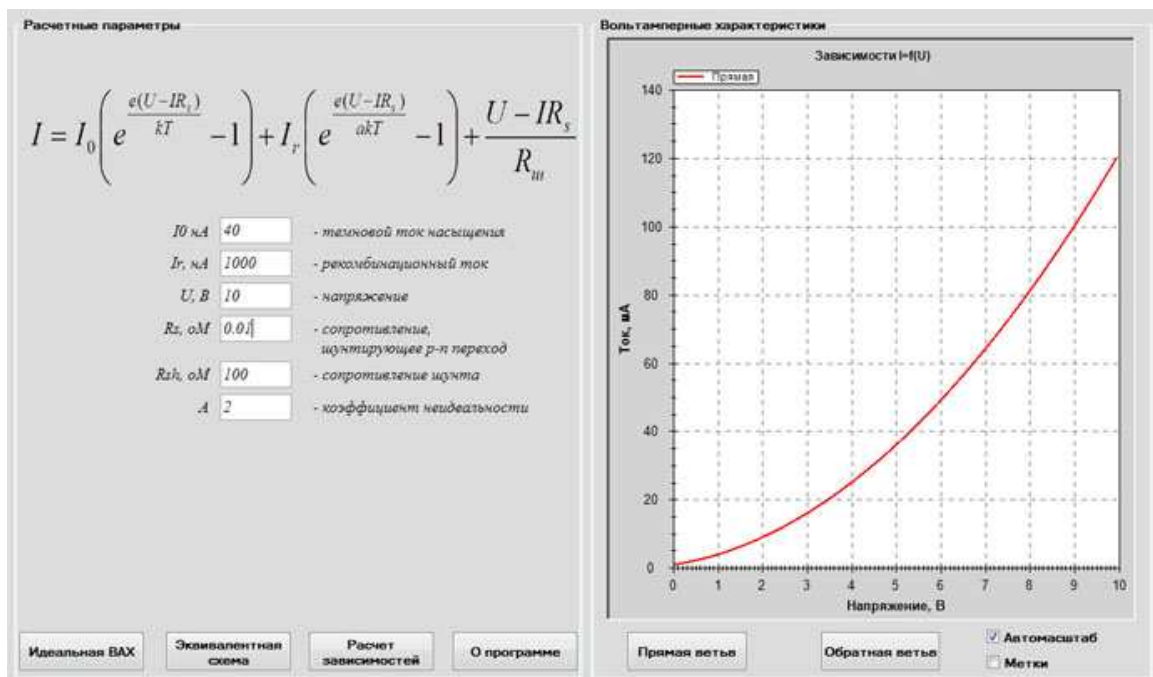


Рис.2 Окно подпрограммы расчета ВАХ $p-n$ перехода

С помощью подпрограммы расчета ВАХ можно изучать влияние параметров I_0 , I_r , R_s , R_{sh} , a на зависимость силы тока от напряжения $I(U)$. Это позволяет лучше понять роль каждой из областей структуры в процессе переноса носителей заряда.

При освещении полупроводника происходит процесс внутренней ионизации под действием света. Он приводит к образованию дополнительных носителей заряда, которые называются неравновесными, в отличие от носителей заряда, которые появляются в результате термической генерации, и находятся в термодинамическом равновесии с решеткой. Эффект появления дополнительных неравновесных носителей заряда называется внутренним фотоэффектом, а добавочную к термически генерированным носителям проводимость называют фотопроводимостью.

Характер нарастания фотопроводимости полупроводника после включения светового импульса описывается уравнением:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{\phi 0} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

Спад фотопроводимости после выключения светового импульса происходит по закону:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{\phi 0} e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}}$$

Данный виртуальный практикум предоставляет возможность изучения зависимости нарастания и спада фотопроводимости от времени жизни неравновесных носителей заряда и времени светового импульса. В результате работы компьютерной программы выводиться график этой зависимости (рис.3).

Были проделаны опыты с образцами из таких материалов как кремний (Si) и германий (Ge), экспериментально найдено время жизни неравновесных носителей заряда для этих материалов. В виртуальном практикуме используется значение времени жизни неравновесных носителей заряда, полученное экспериментально.

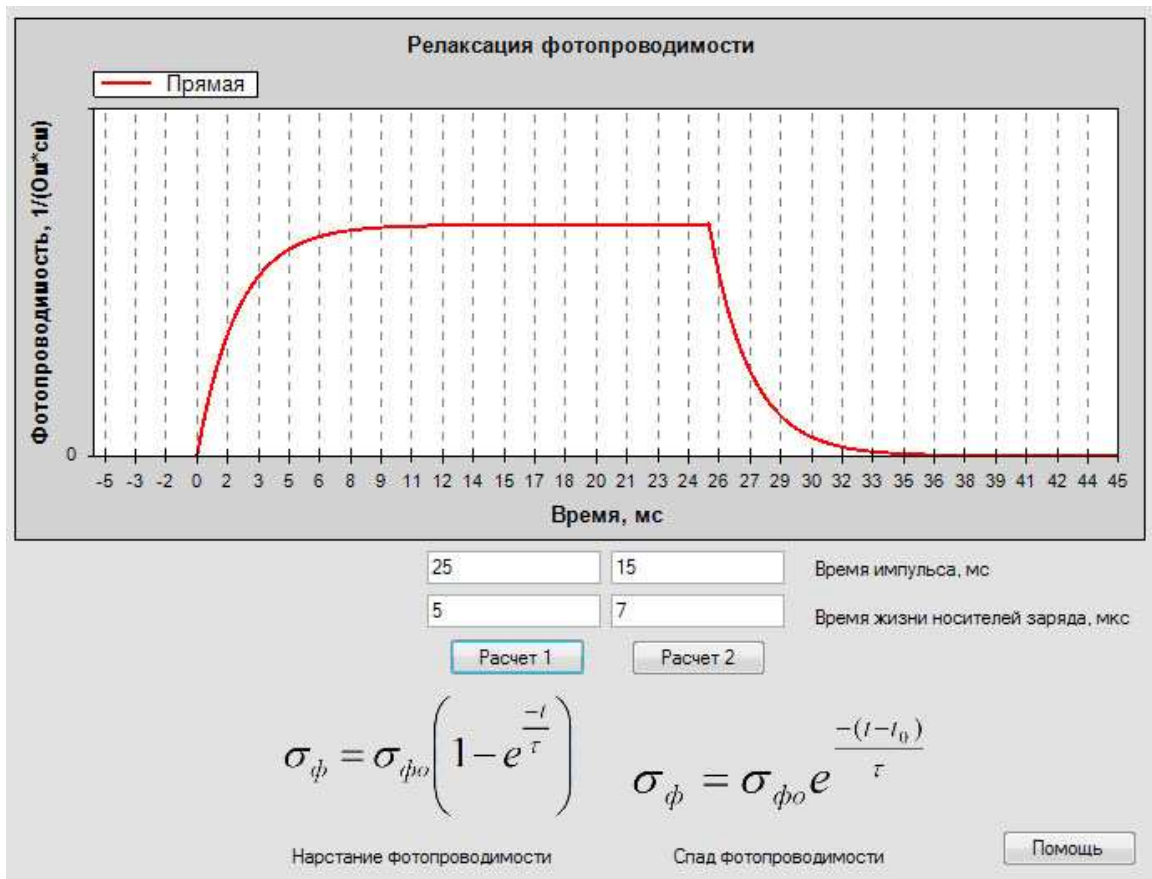


Рис. 3 Окно подпрограммы расчета фотопроводимости

При межзонной излучательной рекомбинации электрон из зоны проводимости переходит в валентную зону, при этом излучается квант света, энергия которого равна ширине запрещенной зоны:

$$h\nu = E_g$$

Интенсивность процесса излучательной рекомбинации пропорциональна произведению концентраций равновесных электронов и дырок. Если не наступает вырождение носителей заряда, то сохраняется пропорциональность скорости рекомбинации, произведению концентраций неравновесных электронов и дырок. В случае малого уровня возбуждения, время релаксации неравновесных электронов запишется так:

$$\tau_{nr} = \tau_{pr} = \frac{n_i^2}{R_{\text{н}}^0 (n_0 + p_0)} \quad (\Delta n = \Delta p, (\Delta n \ll n_0 + p_0))$$

Аналогичная формула будет и для дырок. Для собственных полупроводников время релаксации определяется следующим образом:

$$\tau_{nr} = \frac{E_g}{e z k T} \frac{1}{z \gamma_r (N_c N_v)^{\frac{1}{2}}}, \quad (\Delta n = \Delta p = n_i, \quad \Delta n \ll (n_0 + p_0))$$

Время релаксации неравновесных носителей заряда в собственном полупроводнике при межзонной излучательной рекомбинации тем меньше, чем выше температура и чем меньше ширина запрещенной зоны. Окно компьютерной программы с результатами расчета времени релаксации показано на (рис.4).

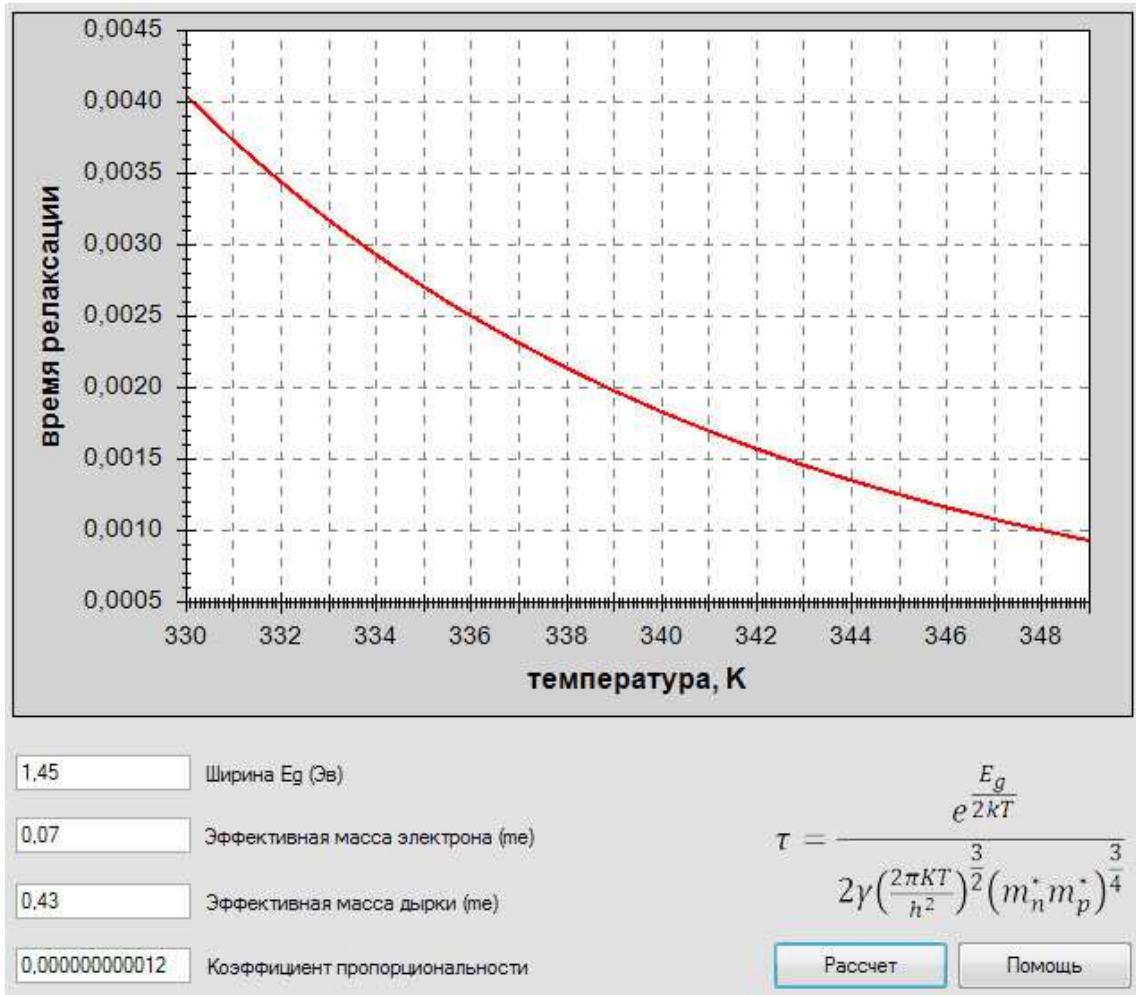


Рис. 4 Окно подпрограммы расчета времени релаксации

Работоспособность и корректность работы программы была проверена на таких образцах как GaAs, Ge, Si. Её можно использовать в проверке результатов натурального эксперимента. Программа рассматривает процессы: межзонную излучательную, ударную рекомбинации, рекомбинацию через ловушки. Моделируются свойства как собственных, так и примесных полупроводников.