

ОГРАНИЧЕНИЕ ВРЕМЕНИ ЖИЗНИ СФЕРИЧЕСКИМИ ДЕФЕКТАМИ СТРУКТУРЫ В ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Вирт И. С., Григорьев Н. Н., Любченко А. В.

Теоретически исследовано влияние протяженных дефектов (включений сферической формы) с повышенным темпом рекомбинации на время жизни неравновесных носителей заряда в фоточувствительной полупроводниковой матрице. Степень их влияния описывается скоростью поверхностной рекомбинации s на границе раздела включение—матрица и эффективной длиной L_c — монотонно возрастающей функции от s , радиуса дефекта r_c и диффузионной длины неосновных носителей L . Вводится критическая плотность включений, выше которой эффективное среднее время жизни $\bar{\tau}$ не определяется объемной скоростью рекомбинации. Расчитаны зависимости $\bar{\tau}$ от плотности и размера включений для твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$ n - и p -типа.

В полупроводниковых материалах точечные и протяженные дефекты структуры, как ростовые, так и введенные внешним воздействием, могут существенным образом определять не только физико-механические, но и электрофизические характеристики полупроводника. К наиболее структурно-чувствительным характеристикам относится фоточувствительность, определяемая средним временем жизни и подвижностью носителей заряда.

Определяющее значение для ограничения фоточувствительности узкозонных полупроводников типа $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) могут иметь протяженные дефекты структуры, органически связанные со спецификой выращивания многокомпонентных твердых растворов. К таким дефектам относятся включения второй фазы (ртути, теллура) [1, 2], вакансионные кластеры, крупномасштабные флуктуации состава, примесные «облака» и дислокационные атмосферы малоугловых границ. Некоторые из них (например, области, обогащенные ртутью в КРТ) являются естественными стоками для неравновесных носителей заряда (ННЗ), поскольку скорость рекомбинации в них существенно выше, чем в матрице кристалла, за счет сужения ширины запрещенной зоны либо повышения концентрации свободных носителей (межузельные атомы Hg—доноры) [3]. Такую же роль могут играть и мелкодисперсионные включения Te, окруженные оболочкой полуметаллической фазы (HgTe) [4, 5]. Скопление акцепторов (вакансии Hg) уменьшает время жизни в результате увеличения скорости шокли-ридовской рекомбинации.

Теоретическое рассмотрение рекомбинации на сферических включениях, основанное на решении диффузионного уравнения и введении скорости поверхностной рекомбинации на границе раздела включение—матрица, было проведено в [6, 7]. Основное внимание в этих работах было уделено случаю, когда включения являются единственным каналом рекомбинации в неоднородной матрице. Далее мы отдельно обсудим полученное в [7] выражение для эффективного времени жизни в случае, когда учитывается также и рекомбинация в нарушенной матрице кристалла.

Рассмотрим матрицу фоточувствительного полупроводника с макродефектами в виде сферических включений радиуса r_c и концентрацией N . Запишем уравнение диффузии для стационарного случая в сферических координатах, поместив начало координат в центр включения, априори предположив, что имеется

одно включение в безграничной однородной матрице кристалла и скорость оптической генерации равномерна по всему объему. Возьмем для определенности материал n -типа, тогда для концентрации неосновных дырок p уравнение диффузии имеет вид

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dp}{dr} \right) - \frac{p}{D\tau} + \frac{G}{D} = 0, \quad (1)$$

где D — коэффициент диффузии дырок, τ — их время жизни в матрице вдали от включения. Выберем граничные условия задачи в виде

$$\frac{dp}{dr} \Big|_{r=r_c} = \frac{S}{D} p \Big|_{r=r_c}, \quad p \Big|_{r \rightarrow \infty} = G\tau. \quad (2)$$

Решение уравнения (1) при граничных условиях (2) описывает пространственное распределение неравновесных дырок вокруг включения

$$p(r) = G\tau \left[1 - \frac{r_c}{r} \frac{sr_c/D}{1 + \frac{r_c}{L} + \frac{sr_c}{D}} \exp\left(\frac{r-r_c}{L}\right) \right], \quad (3)$$

$L = \sqrt{D\tau}$ — диффузионная длина дырок в однородном материале. Пространственному распределению (3) можно приписать некоторую характеристическую

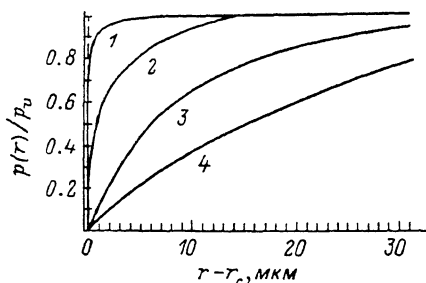


Рис. 1. Распределение концентрации ННЗ вокруг включения при различных значениях его радиуса (r_c).

r_c , мкм: 1 — 0.1, 2 — 1, 3 — 10, 4 — 100. Расчет выполнен по (3) для полупроводника n -типа с параметрами: $\tau_p = \tau_n = 10^{-6}$ с, $L_p = 25$ мкм, $s = 10^7$ см/с.

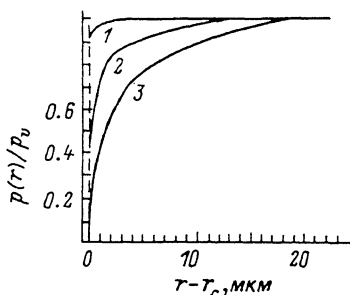


Рис. 2. Распределение концентрации ННЗ вокруг включения радиуса $r_c = 1$ мкм в материале n -типа в зависимости от скорости поверхностной рекомбинации s .

$L_p = 25$ мкм, $\tau_p = 10^{-6}$ с, см/с: 1 — 10^4 , 2 — 10^5 , 3 — 10^7 .

длину затухания величины $p(r)$, выполняющую роль эффективной длины L_e диффузионного смещения. Для включений малых размеров ($r_c \ll L$) величина $L_e \approx r_c$. С увеличением r_c L_e стремится к своему стандартному значению, равному L . Таким образом, имеющий место размерный эффект — рекомбинационная эффективность стока, о которой можно судить по размеру обедненной области, прилегающей к включению, существенным образом зависит не только от величины s , но и от радиуса включения (рис. 1).

Для анализа влияния совокупности равновеликих включений на эффективное время жизни ННЗ выделим объем, относящийся к одному включению $\frac{4\pi}{3} R^3 = N^{-1}$, где $2R$ — расстояние между центрами включений. Эффективное время жизни $\bar{\tau} = \bar{p}/G$ определяется после усреднения (3) по выделенному объему

$$\bar{\tau} = \tau \left\{ 1 - \frac{3r_c L^2}{R^3 - r_c^3} \frac{sr_c/D}{1 + \frac{r_c}{L} + \frac{sr_c}{D}} \left[1 + \frac{r_c}{L} - \left(1 + \frac{R}{L} \right) \exp\left(\frac{r_c - R}{L}\right) \right] \right\}. \quad (4)$$

Зависимости относительной концентрации $\bar{p}/p_v = (\bar{\tau}/\tau)$ ($p_v = G\tau$) от плотности включений N неоднородной матрицы для n - и p -типа проводимости приведены на рис. 3. Из этих зависимостей следует, что при определенных параметрах включений и матрицы существует критическая плотность $N_{кр}$, выше которой концентрация ННЗ резко уменьшается. В общем случае в материале p -типа влия-

ние включений на концентрацию ННЗ должно быть более значительным в силу большей диффузионной длины электронов. Для неоднородных кристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$ с мелкодисперсными включениями второй фазы ($r_c = 0.1$ мкм) $N_{кр} = 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Вариацией параметров включений (r_c, s, N) можно управлять фоточувствительностью неоднородного кристалла, т. е. величиной $\bar{\tau}$, как в сторону ее уменьшения, так и в сторону ее увеличения. Последний эффект можно получить путем коагуляции включений при термическом отжиге кристалла. Результаты расчета на основании выражения (4) приведены на рис. 3 (кривая 5).

Расчет эффективного времени жизни ННЗ при рекомбинации на включениях и рекомбинации в ненарушенной матрице кристалла для случая малой кон-

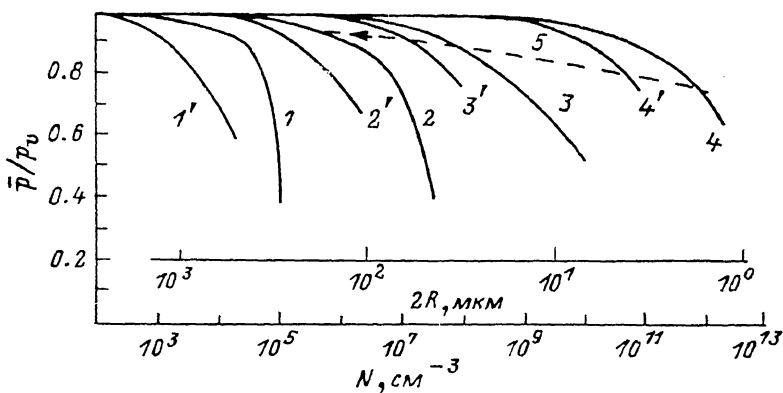


Рис. 3. Зависимость средней концентрации ННЗ от плотности включений N при различных значениях параметра r_c .

r_c , мкм: 1 — 100, 2 — 10, 3 — 1, 4 — 0.1. 1—4 — материал n -типа; 1'—4' — материалу p -типа. $\tau_n = \tau_p = 10^{-6}$ с, $s = 10^7$ см/с, $L_p = 25$ мкм, $L_n = 250$ мкм.

центрации включений ($R \gg r_c$) был проведен в [7]. Использованное в [7] второе граничное условие ($dp/dr|_{r=R} = 0$) отличается от нашего и приводит к иной форме для выражения $\bar{\tau}$. Отметим, что граничное условие (2) позволило здесь ввести понятие эффективной длины диффузионного смещения L_c и тем самым физически обосновать понятие пороговой концентрации включений, выше которой эффективное время жизни определяется параметрами включений. Потеря фоточувствительности матрицы с включениями наступает при условии $R \leq r_c + L_c$ (s, r_c).

В реальных кристаллах влияние протяженных дефектов на фоточувствительность имеет, естественно, более сложный характер. Необходимо, в частности, учитывать область пространственного заряда вокруг макродефекта, сформированную пространственным перераспределением электрически активных точечных дефектов в результате деформации решетки (включения второй фазы) либо встроенным квазиэлектрическим полем (крупномасштабные флуктуации состава твердого раствора [8]), дисперсию дефектов по размеру, возрастание доли нефотоактивного оптического поглощения [9], уменьшение подвижности носителей. Влияние этих факторов можно учесть при наличии информации о химической природе и параметрах макродефектов.

Авторы признательны Е. А. Салькову за полезную дискуссию при обсуждении работы.

Л и т е р а т у р а

- [1] Бойных Н. М., Соколов А. М., Иденбаум Г. В., Ванюков А. В. Структура кристаллов твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$, полученных из расплава. — Изв. АН СССР, сер. Металлы, 1974, № 5, с. 240—242.
- [2] Grillham C. J., Farrar R. A. — J. Mater. Sci., 1977, v. 12, N 10, p. 1994—2000.
- [3] Любченко А. В., Сальков Е. А. Влияние неоднородностей состава на время жизни носителей в кристаллах $Cd_xHg_{1-x}Te$. — УФЖ, 1979, т. 24, в. 5, с. 708—709.
- [4] Власенко А. И., Гаврилюк Ю. Н., Латута В. З., Любченко А. В., Сальков Е. А. Время жизни в кристаллах $Cd_xHg_{1-x}Te$, ограниченное флуктуациями состава и выделениями второй фазы. — Письма ЖТФ, 1979, т. 5, в. 16, с. 1013—1017.

- [5] Крапухин В. В., Стафеев В. И., Бовина Л. А., Каган Н. Б., Любченко А. В. Трубочатая структура дефектов роста эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$. — Кристаллография, 1982, т. 27, в. 2, с. 400—402.
- [6] Концевой Ю. А. О рекомбинации в полупроводниках с макроскопическими дефектами. — ФТП, 1970, т. 4, в. 6, с. 1184—1187.
- [7] Коноплева Р. Ф., Юферев А. А. О рекомбинации на областях разупорядочения. — ФТП, 1975, т. 9, в. 3, с. 413—419.
- [8] Елизаров А. И., Иванов-Омский В. И., Корниаш А. А., Петряков В. А. К вопросу об аномалиях кинетических коэффициентов в $Hg_{1-x}Cd_xTe$ при низких температурах. — ФТП, 1984, т. 18, в. 9, с. 201—205.
- [9] Несмелова И. М., Панасенко З. К., Матшина Н. П., Аверьянов И. С. Влияние включений второй фазы на спектры поглощения свободными носителями в монокристаллах $Cd_xHg_{1-x}Te$. — ФТП, 1984, т. 18, в. 7, с. 1210—1213.

Институт полупроводников
АН УССР
Киев

Получена 24.10.1986
Принята к печати 21.07.1987

Бондарь Б. Г. Основы микроэлектроники. Киев: Вища школа, 1987. 309 с.

В книге — учебном пособии для студентов вузов изложены важнейшие сведения, относящиеся к функциям, принципам работы и технологии интегральных микросхем (ИС). Даны необходимые элементы физики полупроводников. Освещены принципы проектирования и технологические методы, используемые при изготовлении ИС (в частности, пленочная технология, методы изготовления подложек и т. д.). Описаны важнейшие элементы и компоненты ИС (биполярные и полевые транзисторы, пассивные компоненты). Последовательно рассмотрены цифровые и аналоговые ИС (микропроцессоры, запоминающие устройства, аналоговые микросхемы для приемноусилительной аппаратуры, ИС для интегральных фильтров, ИС диапазона СВЧ). Значительное место отведено функциональной микроэлектронике, в том числе оптоэлектронике, акустоэлектронным устройствам на объемных и поверхностных акустических волнах, магнитоэлектроника, приборам с переносом заряда, криоэлектронике. Обсуждаются особенности конструктивно-технологического применения ИС, а также вопросы качества и надежности.