

О ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ В МОДЕЛИ ПОЛУПРОВОДНИКА С ПАРНЫМИ РЕКОМБИНАЦИОННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ

А.Ю.Лейдерман – доктор физико-математических наук, профессор
Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз.

М.Т.Нсанбаев – ассистент преподаватель

Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза

Таянч сўзлар: рекомбинация, донор-акцептор жуптлари, рекомбинация марказлари концентрациясининг кичрайиши, номувонзатий заряд ташувчилари концентрациясининг даврий тақсимланиши.

Ключевые слова: рекомбинация, донорно-акцепторная пара, уменьшение концентрации рекомбинационных центров, периодическое распределение концентрации неравновесных носителей.

Key words: recombination, donor-acceptor pairs, a decrease in the concentration of recombination centers, periodic distribution of the concentration of non-equilibrium carriers.

1. Введение. Хорошо известно, что существует большое количество полупроводников, в который присутствуют так называемые донорно-акцепторные пары, т.е. комплексы, внутри которых возможен обмен электронами. Вследствие этого рекомбинация в таких материалах проходит с участием времени внутрикомплексного обмена электронами и скорость рекомбинации описывается выражением [1,2]:

$$U = N_R \frac{c_{n1}c_{p2}(pn - n_i^2)}{c_{n1}(n + n_{11}) + c_{p2}(p + p_{12}) + \tau_i c_{n1}c_{p2}pn}, \quad (1)$$

где N_R – концентрация комплексов, c_{n1} – сечение захвата электрона на уровень E_1 , c_{p2} – сечение захвата дырки на уровень E_2 , τ_i – время внутри комплексного обмена электронами, n_{11} и p_{12} – аналоги статистических факторов Шокли-Рида для уровней E_1 и E_2 :

$$n_{11} = N_c e^{\frac{E_c - E_1}{kT}}, \quad p_{12} = N_v e^{\frac{E_v - E_2}{kT}} \quad (2)$$

Схема рекомбинации через такую донорно-акцепторную пару показана рис.1.

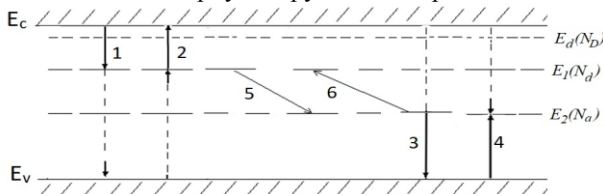


Рис.1. Схема рекомбинации через донорно-акцепторный комплекс. Штрих-пунктирами показаны неучитываемые переходы.

1 – $c_{n1}N_R(1 - f_1)n$; 2 – $c_{n1}N_R f_1 n_{11}$ – обмен носителями между уровнем E_1 и зоной проводимости. 3 – $c_{p2}N_R f_2 p$; 4 – $c_{p2}N_R(1 - f_2)p_{12}$ – обмен носителями между уровнем E_2 и валентной зоной. 5 – $c_{21}N_R f_1(1 - f_2)$, 6 – $c_{12}N_R f_2(1 - f_1)$ – обмен носителями между уровнями E_1 и E_2 , где $(c_{12})^{-1} = \tau_i$ – время внутрикомплексного обмена между уровнями E_1 и E_2 . Предполагается, что разность $c_{21} = c_{12}$, т.е. переходы 5 и 6 равновероятны.

Следует подчеркнуть, что подобные модели рассматривались на протяжении многих лет для различных материалов и разных условий возбуждения, но во всех этих работах всегда постулировалось, что концентрация рекомбинационных пар всегда остается постоянной, т.е. мы имеем $N_d = N_a \equiv N_R = const$.

Это касается даже и работы [3], в которой учитывалось воздействие заполнения электронами (или дырками) нижнего уровня на коэффициент захвата электронов верхним уровнем, но при этом N_R оставалось постоянным!

Цель данной работы – показать, что возможное изменение концентрации донорно-акцепторных пар может привести к принципиальным изменениям.

2. Модель. Как отмечалось выше, ранее всегда предполагалось, что $N_R = const$ т.е. в процессе возбуждения полупроводника (фотовозбуждением или инъекцией) концентрация донорно-акцепторных пар не меняется.

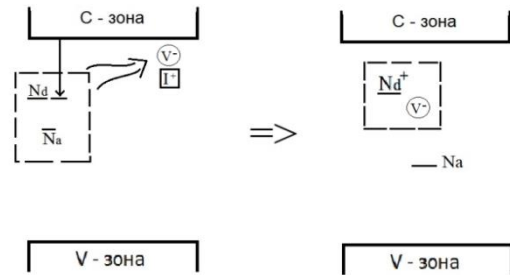


Рис.2. Схема уменьшения числа рекомбинационно-активных донорно – акцепторных пар в результате рекомбинационно – стимулированного образования пары Френкеля типа отрицательно заряженная вакансия + положительно заряженный ион внедрения с последующим образованием новой пары – положительно заряженный донор + отрицательно заряженная вакансия.

Между тем, легко представить ситуацию когда это будет не так. Например (см. рис. 2), при захвате электрона на положительно заряженный донор выделяется энергия, которой окажется достаточно, чтобы создать пару Френкеля типа положительно заряженный ион внедрения+отрицательно заряженная вакансия ($I^+ + V^-$). Если эта отрицательно заряженная вакансия окажется возле другого положительно заряженного донора, то, в силу кулоновского взаимодействия, может возникнуть новый комплекс типа $(N_d^+ + V^-)$, т.е. положительно заряженный донор + отрицательно заряженная вакансия.

Такие комплексы, как известно, легко образуются в частности в n – полупроводниках типа $A^{III}B^V$, выращенных по методу Чохральского (см. например [4]), и в материалах типа $A^{II}B^{VI}$ (см. например [5]). Этот донор уже не сможет участвовать в обмене электронами со своим акцептором, так как его рекомбинационная активность будет заблокирована вакансией. В результате количество активно работающих донорно-акцепторных пар уменьшится, т.е. N_R теперь уже не будет посто-

янным, оно будет изменяться в процессе возбуждения полупроводника.

3. Расчёт и обсуждения. Рассмотрим, как этот процесс может изменить процессы токопрохождения в обычной $p-n-n^+$ -структуре в условиях сильного возбуждения полупроводника. Когда $n \approx p > n_{11}, p_{12}$ и последний член в знаменателе выражения (1) становится определяющим. Тогда скорость рекомбинации стремится к насыщению

$$U \approx \frac{N_R}{\tau_i} \left(1 - \frac{1}{\tau_{ii} c_{\text{эф}} p}\right), \quad (3)$$

где $c_{\text{эф}} = \frac{c_{n1} c_{p2}}{c_{n1} + c_{p2}}$. Как видно из (3), с ростом возбуждения второй член в скобке убывает, так что в модели, которую мы далее будем рассматривать мы им пренебрегаем.

$$U \rightarrow U_{\text{lim}} \approx \frac{N_R}{\tau_{ii}}, \quad (4)$$

Если бы мы далее хотели рассматривать прохождения тока в $p-n-n^+$ -структуре при такой скорости рекомбинации, то должны бы были записать основное уравнение задачи в виде:

$$D_p \frac{d^2 p}{dx^2} - U_{\text{lim}} = 0. \quad (5)$$

И получили бы решение (5) в виде гиперболической функции [6]

$$p = \frac{N_R}{\tau_{ii}} x^2 + C_1 x + C_2, \quad (6)$$

где C_1 и C_2 – произвольные постоянные, зависящие от условий на границах n -базы с $p-n$ и $n-n^+$ -переходами (см. рис. 3).

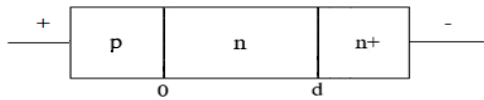


Рис. 3. Схема $p-n-n^+$ -структуры.

Теперь рассмотрим случай, когда концентрация парных комплексов не остается постоянной в процессе возбуждения полупроводника, т.е. количество рекомбинационно - активных комплексов убывает в процессе возбуждения (инжекции). Не останавливаясь на конкретных причинах такого процесса, просто запишем концентрацию реально рекомбинационно - активных пар в виде:

$$N_{\text{Ract}} = N_R - \alpha P, \quad (7)$$

Где α – некий коэффициент, определяющий процесс дезактивации комплекса. Тогда основное уравнение задачи (5) принимает вид:

$$\frac{d^2 p}{dx^2} - \frac{N_R - \alpha P}{L_i^2} = 0, \quad (8)$$

Где $L_i = \sqrt{D_p \tau_i}$ – новая характеристическая длина. Введя новую переменную $P_N = \alpha P - N_R$,

перепишем уравнение (8) в виде:

$$\frac{d^2 P_N}{dx^2} - \frac{\alpha}{L_i^2} P_N = 0, \quad (10)$$

По виду (10) - уравнение, описывающее поведение гармонического осциллятора, и его решение имеет вид:

$$P_N = A \cos \omega x + B \sin \omega x, \quad (11)$$

где частота возникающих колебаний концентрации

$$\omega = \sqrt{\frac{\alpha}{L_i}}, \quad (12)$$

т.е. зависит непосредственно от процесса дезактивации комплексов (α) и времени внутри комплексного обмена электронами τ_i ($L_i = \sqrt{D_p \tau_i}$), учитывая (9), можно записать (11) в виде:

$$N_R - \alpha P = A \cos \omega x + B \sin \omega x, \quad (11a)$$

$$\text{или} \quad P \approx \frac{N_R}{\alpha} + \frac{A}{\alpha} \cos \omega x + \frac{B}{\alpha} \sin \omega x, \quad (11b)$$

где A и B постоянные. Таким образом, появление члена αP привело к возникновению совершенно нового типа решения – периодического (в отличие от обычного экспоненциального или гиперболического, полученного при постоянной скорости рекомбинации). При этом следует помнить, что решения (11) - (11b) – приближенные, в них невозможен переход к случаю $\alpha = 0$, он возможен только в исходном уравнении (8). В нашей модели $\alpha P < N_R$ - всегда. Поэтому в (11) - (11b) периодические добавки должны быть всегда меньше нуля. Постоянные A и B находим из граничных условий в точках $x=0$ и $x=d$ (т.е. на границах квазинейтральной n -базы с $p-n$ и $n-n^+$ -переходами, см. рис. 3).

При $x=0$ и $\alpha P(0) = N_R + A$

При $x=d$ и $\alpha P(d) = N_R + P(0) \cos \omega d + B \sin \omega d$,

$$A = \alpha P(0) - N_R, \quad B = \frac{\alpha P(d) - N_R - P(0) \cos \omega d}{\sin \omega d} \quad (14)$$

Как всегда в случае периодических решений результат будет сильно зависеть от размеров образца, но так или иначе полученное решение имеет периодическую добавку, которая может принципиально изменить процессы токопрохождения в структуре.

Следует особо подчеркнуть, что такое решение может реализоваться только на падающем участке U , (см. рис. 4) а он не может быть протяженным.

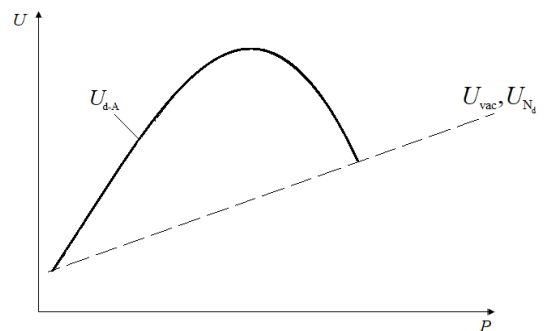


Рис. 4. Качественная зависимость изменения скорости рекомбинации от уровня возбуждения. Штрих-пунктиром показана рекомбинация, обусловленная вакансиями или отдельными донорами. Тёмным выделена область $U(p)$, в которой возможно возникновение периодического решения.

В нашей простой модели мы ограничивались рассмотрением рекомбинации только через парный комплекс. Но когда активность его начинает спадать, могут начать играть роль другие рекомбинационные процессы, присущие данному полупроводнику, в частности рекомбинация через отдельные составляющие комплекса, т.е. через доноры и акцепторы, рекомбинация

через вакансии, которые, как известно, тоже могут служить каналом рекомбинации, и другие дефекты. Так что периодическое решение типа (11) возможно только на небольшом падающем участке зависимости $U(p)$ (см. рис. 4).

4. Заключение. Таким образом, предположение о возможности изменения числа рекомбинационно-активных парных комплексов в процессе возбуждения материала приводит к совершенно новому результату.

Литература

1. Leyderman A.Yu, Minbaeva M.K. Mechanism of rapid growth of the direct current in semiconductor diode structures. Semiconductors, 1996. V. 30, №11, -P. 905-909.
2. Leyderman A.Yu, Khashaev M.M. Features of recombination in $A^{III}B^V$ semiconductors. Reports of the Academy of Science R Uz. 2012, №3, -P. 22-24. (in Russian).
3. Leyderman A.Yu, Uteniyazov A.K., Nsanbaev M.T. Recombination statistics of non-equilibrium carriers in the model of semiconductor with donor-acceptor pairs possessing variable recombination activity. Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. 2020. V. 23, №3, P. 290-293.
4. Булярский С.В., Фистуль В.И. Термодинамика и кинетика взаимодействующих дефектов в полупроводниках. –Москва: «Наука» 1997, -С. 350.
5. Girin V.F., Lyubchenko A.V., Salkov E.A., Sheinkman M.K. Recombination through donor-acceptor complexes in CdS single crystals. Fizika tekhnika poluprovodnikov. 1975, V 9, №2, -P. 303-310 (in Russian).
6. Leyderman A.Yu, Stelmakh V.G. Self-Organization processes in photocells with average base. Appl, Solar Energy, 2008, vol.44, №3, -P. 10-14.

РЕЗЮМЕ

Бу мақолада материални қўзғатиш жараёнида жуфт рекомбинацион комплексларнинг концентрацияси ўзгарган (пасайиши) шароитида донор-акцептор жуфтлиги типидagi номувозонатий заряд ташувчиларнинг рекомбинация модели кўрсатилган. Бунинг, $p-n-n^+$ - структурасига инжекция қилинганда эркин ташувчилар концентрациясининг тақсимланишида принципиал ўзгаришларга, яъни концентрациянинг намуна узунлигига боғлиқлиги даврий аъзонинг пайдо бўлишига олиб келиши кўрсатилган (одатдаги экспоненциал боғлиқлик ўрнига).

РЕЗЮМЕ

В статье рассмотрена модель рекомбинации неравновесных носителей через парный рекомбинационный комплекс типа донорно-акцепторной пары в условиях, когда концентрация таких парных комплексов изменяется (уменьшается) в процессе возбуждения материала. Показано, что это может привести к принципиальным изменениям в распределении концентрации свободных носителей при инжекции в $p-n-n^+$ - структуре, а именно к появлению периодического члена в зависимости концентрации от длины образца (вместо обычной экспоненциальной зависимости).

SUMMARY

In the article, the model of the recombination of non - equilibrium carriers through a pair recombination complex of the donor-acceptor pair type is studied under conditions when the concentration of such paired complexes changes (decreases) during the excitation of the material. Also, the article describes that the injection into the $p-n-n^+$ - structure can lead to fundamental changes in the distribution of the concentration of free carriers, especially, to the appearance of a periodic term depending on the concentration of the sample length (instead of the usual exponential dependence).

:631.3: 631.173

МАШИНА – ТРАКТОР АГРЕГАТЛАРИНИНГ ИШ УНУМИНИ ОШИРИШНИНГ БАЗИ МАСАЛАЛАРИ

Р.О.Садықов – техника фанлари номзоди, доцент

С.М.Орынбаева – ассистент ўқитувчи

М.Р.Оразалиев – талаба

Тошкент давлат аграр университети Нукус филиали

Таянч сўзлар: машина-трактор агрегати, иш уними, асосий омиллар, техник ва ишлаб чиқаришда тўғри фойдаланиш, оптимал фойдаланиш, техник таъминлаш, тортиш қуввати, смена вакти, ФИКини ошириш.

Ключевые слова: машина-трактор агрегат, производительность, основные факторы, оптимальное использование агрегатов в техническом и производственном эксплуатации, оптимальная эксплуатация, техническое обеспечение, тяговый мощность, сменная время, повышения КПД.

Key words: machine-tractor unit, productivity, main factors, optimal use of units in technical and industrial operation, optimal operation, technical support, tractive power, shift times, efficiency increase.

Қишлоқ хўжалиги ишлаб чиқаришининг деҳқончилик соҳасидан мўл ва сифатли маҳсулот олишда машина-трактор агрегатларининг иш унуми, яъни уларнинг белгиланган агромуудатларда агротехник талабларга мос бажарилган иш ҳажми асосий омиллардан бири ҳисобланади.

Шунинг учун деҳқончиликда фойдаланиладиган ҳар бир машина-трактор агрегатларининг иш унумини ошириш учун уларни техник ва ишлаб чиқаришда тўғри фойдаланиш, ушбу соҳадаги муҳандис-техник ходимларнинг олдида турган ечимини топиш керак бўлган долзарб масалалардан бири ҳисобланади.

Машина-трактор агрегати (МТА) – бу механик (тракторларга тиркаладиган ёки осма) ёки электр энергияси (электр двигателидан ҳаракат оладиган) манбаига эга қишлоқ хўжалиги агрегати.

Машина-трактор агрегатларининг техник (МТА фойдаланиши техник таъминлаш) фойдаланиш учун уларни иш қобилятида (соз ҳолат) ишлатиш, ишлаб чиқаришда фойдаланиш бўлса, уларни фақат белгиланган мақсадда тўғри фойдаланишни назарда тутати. МТАнинг оптимал фойдаланиши таъминлаш ишлари, фақатгина улардан техник талабларга мос тузишни ташкиллаштирилишига боғлиқ.