

МОДЕЛЬ ТОКОПЕРЕНОСА НОСИТЕЛЕЙ В ТОНКИХ ФОТОПРЕОБРАЗУЮЩИХ ПЛЕНКАХ НА ОСНОВЕ А-SI:H

**Н.И. Слипченко, М.А. Быков, А.М. Быков*, С.А. Зуев*, А.С. Мазинов*,
В.А. Бахов***

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
пр. Ленина, 14, г. Харьков, 61166*

**Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского,
пр. Вернадского, 4, г. Симферополь, 95007, АРК*

Описана физико-математическая модель и методика численных исследований токопереноса фотоносителей в тонких пленках аморфного гидрогенизированного кремния. Приводятся результаты расчетов зависимости фототока от толщины пленки.

ВВЕДЕНИЕ

Пленки аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H) в настоящее время получили достаточно широкое распространение как материал для создания микроэлектронных приборов: фотопреобразователей энергии, тонкопленочных транзисторов, диодов и т.п. Характеристики таких устройств определяются как свойствами материалов, так и геометрией, в частности, толщиной пленки аморфного кремния.

Недостаток глубоких знаний о физике процессов, происходящих в структурах на основе неупорядоченных полупроводников, включая процессы транспорта и рекомбинации носителей заряда, отсутствие ясных представлений об их свойствах и закономерностях формирования затрудняет практическую реализацию приборов на их основе.

В работах, посвященных изучению электрических и фотоэлектрических свойств данного материала, измерения и расчеты проводились на пленках, толщина которых более 1 мкм. Технология позволяет создавать приборы на основе пленок меньшей толщины, вплоть до десятков нанометров. Исследования, проведенные в работах [1-3], показали, что величина проводимости и фотопроводимости пленок a-Si:H зависит от их толщины, причем характер изменения данных параметров при изменении толщины различен для нелегированных и легированных пленок a-Si:H.

Целью данной работы являются исследования с помощью численно-аналитической модели и использования экспериментальных данных механизмов переноса и свойств пленок a-Si:H с толщиной, меньшей 1 мкм, когда толщина пленки соизмерима с диффузионной длиной неравновесных носителей и характерными размерами области приповерхностного искривления зон, обусловленного поверхностными состояниями.

МОДЕЛЬ СТРУКТУРЫ

Решение поставленной задачи наиболее целесообразно проводить в кинетическом приближении. При описании процессов переноса носителей в аморфном кремнии можно использовать модель, предложенную в [2, 3], дополнив ее представлениями из [4]. При этом процесс переноса носителей в аморфном кремнии описывается в терминах прыжковой проводимости для неупорядоченной системы с наличием случайного поля хаотически расположенных заряженных точечных центров. Проводимость описывается переходами носителей между различными локализованными состояниями.

Потенциал внешнего электрического поля в пленке удовлетворяет уравнению Пуассона [4]:

$$\Delta\varphi = -\frac{1}{\varepsilon}(\rho(\vec{r}) - \sum_i e_i \int f_i d\vec{v}_i), \quad (1)$$

где ρ – объемный заряд примесей; $\sum_i e_i \int f_i d\vec{v}_i$ – объемный заряд, создаваемый свободными носителями. Корреляционная функция случайного поля представляется в виде [5]:

$$\varphi_0(r) = \frac{2\pi n_i e^4}{\varepsilon^2} r_0 \exp\left(-\frac{r}{r_0}\right), \quad (2)$$

где $r_0 = \left(\frac{4\pi n_0 e^2}{\varepsilon T}\right) = \alpha^{-1}$ – радиус экранирования; n_i – концентрация центров; e – заряд электрона; ε – диэлектрическая проницаемость образца, а $r = r_1 - r_2$ – расстояние между двумя точками в образце. Таким образом, внешняя электрическая сила, действующая на носители заряда $\vec{F} = \nabla_r \psi(\vec{r}, t)$, где $\psi = \varphi + \varphi_0$ – потенциал электрического поля в точке его действия на носитель тока.

Кинетическое уравнение для аморфного кремния в стационарном состоянии можно записать в виде, предложенном в [5], переписав правую часть с учетом всех основных процессов генерации и рекомбинации носителей тока.

$$\frac{\partial f_\lambda}{\partial t} = -\sum_{\lambda'} \{W_{\lambda\lambda'} f_\lambda (1 - f_{\lambda'}) - W_{\lambda'\lambda} f_{\lambda'} (1 - f_\lambda)\}, \quad (3)$$

где f_λ – неравновесный диагональный элемент одночастичной матрицы плотности; $W_{\lambda\lambda'}$ – вероятность перехода между состояниями λ и λ' .

Вероятности перескоков между различными парами центров меняются случайным образом и в широком интервале. В результате изменения заселенности состояний наиболее легкие направления перескоков могут быть блокированными.

Генерация носителей тока характеризуется темпом оптической генерации G , который зависит от мощности потока излучения, энергии фотонов, вероятности фотопоглощения и глубины. При описании диффузии фотогенерированных носителей заряда можно воспользоваться законом поглощения света Ламберта: $G = G_0 \exp(-\chi cd)$, где χ – удельный показатель поглощения света в a-Si:H, c – концентрация вещества; d – глубина, на которой рассчитывается поглощение.

Для описания фотопроводимости использовались следующие модели рекомбинации:

1) рекомбинация «зона - хвост» происходит при захвате неравновесного носителя из свободной зоны на состояние хвоста противоположной зоны, захватившее перед этим носитель другого знака и действующее как рекомбинационный центр. Количество состояний хвоста увеличивается по мере уменьшения температуры;

2) рекомбинация «хвост - оборванная связь» происходит при туннелировании захваченных носителей из состояния хвостов зон на состояния оборванных связей;

3) рекомбинация «хвост - хвост» - это туннельная рекомбинация между электронами, захваченными на состояния хвоста зоны проводимости, и дырками, захваченными на состояния хвоста валентной зоны.

В [3] показано, что в действительности нужно учитывать все возможные механизмы рекомбинации и выделять из них основной в зависимости от спектра состояний носителей, типа и концентрации дефектов, внешних условий (температура, интенсивность света и т.д.).

При описании процессов рекомбинации носителей и их захвата на соответствующие ловушки использовалась модель, предложенная в [2, 3] и дополненная представлениями, описанными в [5]. Плотность состояний в неупорядоченном полупроводнике при $|E| \gg \sqrt{\psi_1}$ определяется следующим уравнением:

$$\rho(E) = \frac{\psi_1 \exp\left(-\frac{E^2}{2\psi_1}\right)}{2\pi^2 |E|^{3/2}} + \frac{\alpha \cdot \exp\left(-\frac{E^2}{2\psi_1}\right)}{8\sqrt{2\pi}^{3/2} \sqrt{\psi_1}} \left(E - \frac{\alpha |E|^{3/2}}{\sqrt{2\pi\psi_1}} \right), \quad (4)$$

где $\psi_1 = 2\pi n_i e^4 r_0 / \varepsilon^2$; E - энергия состояния; $\alpha^{-1} = r_0$ - характерная длина, роль которой играет радиус экранирования.

Определив вероятности генерации и рекомбинации носителей, входящие в правую часть кинетического уравнения, можно решить систему уравнений (1), (3). В аморфном полупроводнике поле, найденное из уравнения (1), дополняется случайной аддитивной добавкой (2). Методика решения рассмотренной выше системы уравнений подробно изложена в [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчет проводился для тонких пленок a-Si:H. Результаты расчетов сравнивались с результатами экспериментальных исследований.

В ходе дальнейших расчетов использовались данные работы [1], в которой полупроводниковые пленки a-Si:H были получены на магнетронной установке типа УРМЗ.279.026, при давлении в рабочей камере $10^{-2} - 10^{-3}$ Па, при напряжении и токе мишени - 500-650В и 1,5-2А. Скорость роста составляла 0,3-0,4 мкм/мин. Сверху на пленку дополнительно наносились алюминиевые омические контакты с использованием пленочных и металлических масок.

Ширина щели подвижности принималась равной 1,8 эВ. Положение уровня Ферми относительно потолка валентной зоны задавалось равным 1,05 эВ. Для параметров оборванных связей принимались следующие значения: $E_D = 0,9$ эВ, $U = 0,3$ эВ. Начальный темп фотогенерации принимался равным $G_0 = 10^{19}$ см⁻³с⁻¹. Из полученной экспериментально спектральной зависимости коэффициента поглощения на частотах видимого спектра [1] рассчитывался коэффициент оптической генерации. В результате при решении кинетического уравнения получены зависимости коэффициента прохождения неравновесных носителей η от толщины пленки (рис.1) для разных значений напряженности электрического поля (кривые 1 - E=3 кВ/см, 2 - E=8 кВ/см, 3 - E=20 кВ/см).

Расчет проводимости пленок проводился для аморфного кремния с различной степенью гидрирования в области низких напряженностей внешнего поля (до 3 кВ/см). На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований (обозначены точками) и численного

моделирования (сплошные кривые) тепловой удельной проводимости σ для различных концентраций водорода (кривые 1 - 10%, 2 - 30%, 3- 40%). Полученные в результате моделирования зависимости удельной проводимости хорошо согласуются с экспериментальными данными.

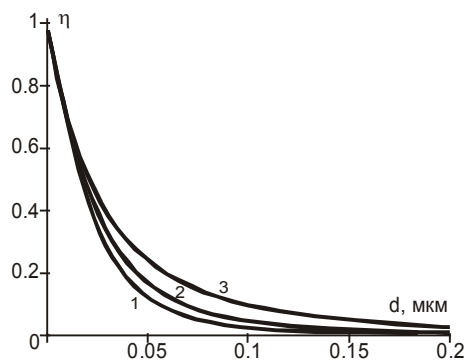


Рисунок 1 – Вероятности прохождения носителей

Как видно из рис. 2, проводимость аморфного кремния возрастает с увеличением концентрации водорода в рабочей камере. Это свидетельствует о том, что при напылении происходит обогащение пленки аморфного кремния водородом, который компенсирует оборванные связи.

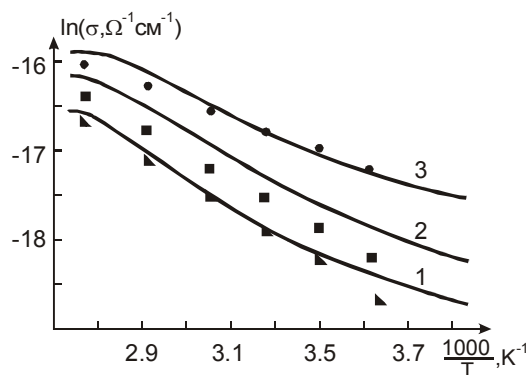


Рисунок 2 – Удельная проводимость $a\text{-Si:H}$ пленок, полученных магнетронным методом

Анализ зависимости удельной проводимости от напряженности внешнего поля в пленке на $a\text{-Si}$ показал, что, во-первых, удельная проводимость зависит от толщины пленки, во-вторых, при напряжениях порядка 3-5 кВ/см характер зависимости проводимости от напряженности поля меняется (рис.3). Так как с увеличением толщины увеличивается количество фотогенерированных носителей, а вероятность их собирания падает из-за рекомбинационных процессов, должна существовать такая толщина пленки, при которой эти процессы согласуются.

Анализ зависимостей фототока при облучении светом с длиной волны 0,47 мкм от толщины пленки аморфного кремния (рис.4), полученных из расчетов (кривая 1) и экспериментально [6] (кривая 2), показал наличие такой оптимальной толщины.

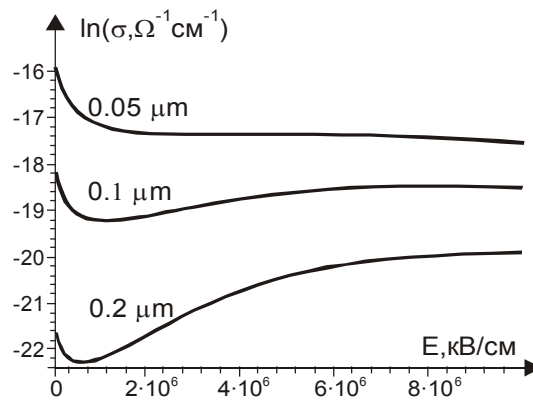


Рисунок 3 – Зависимость удельной проводимости от напряженности внешнего поля *a-Si:H* пленки

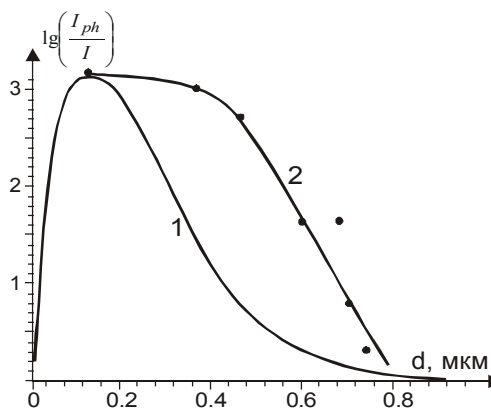


Рисунок 4 – Зависимости фототока от толщины пленки

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена модель, которая адекватно описывает процессы фотогенерации и переноса носителей в *a-Si:H*. В результате проведенных исследований получены зависимости проводимости пленок от параметров аморфного кремния. Показана зависимость фотопроводимости от толщины пленки аморфного кремния. Установлено, что наиболее эффективно преобразование наблюдается при толщине 0,3-0,4 мкм.

SUMMARY

MODEL CURRENT TRANSFER CARRIERS IN THIN PHOTOREFORMATIVE FILMS ON A BASIS OF *a-Si:H*

N.I. Slipchenko, M.A. Bykov, A.M. Bykov, S.A. Zuev*, A.S. Mazinov*, V.A. Bahov**
 Kharkov National University of Radio and Electronics, Kharkiv
 *Tavrisheskyi National University, Simferopol

The physical and mathematical model and technique of numerical researches photocarriers current in hydrogenised thin amorphous silicon films is described. Results of photocurrent dependence from film thickness calculations are presented.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M.A. Bykov, A.S. Mazinov Optical spectral characteristics of thin-film constructions on the basis of hydrogenated amorphous silicon // Proc. of SPIE - Vol. 6023. - P.60230Q1-60230Q9.
2. Кузнецов С.В., Теруков Е.И. Влияние хвостов зон a-Si:H на заполнение оборванных связей и величину фотопроводимости // ФТП. – 2001. – Т.35, Вып.6. – С.684-686.
3. Кузнецов С.В. Численный расчет температурных зависимостей фотопроводимости a-Si:H р-типа // ФТП. – 2001. – Т.35, Вып.10. – С.1244-1249.
4. Зуев С.А., Старостенко В.В., Терещенко В.Ю., Чурюмов Г.И., Шадрин А.А. Модель ПТШ субмикронных размеров на кремнии // Радиоэлектроника и информатика. – 2004. – №3, Ч.1. – С.47–53.
5. Электронная теория неупорядоченных полупроводников / Бонч-Бруевич В.Л., Звягин И.П., Кайпер Р., Миронов А.Г., Эндерлайн Р., Эсер Б. – М.: Наука, 1981. – 384 с.
6. Hamakawa Y., Tawada Y., Int. J. Sol. Energy, 1, 125 (1982).

Слипченко Н.И., профессор;

Быков М.А., младший научный сотрудник каф. МЭПУ;

Быков А.М., кандидат физ.-мат.наук, доцент каф. общей физики;

Зуев С.А., кандидат физ.-мат.наук, старший преподаватель каф. радиофизики и электроники;

Мазинов А.С., кандидат физ.-мат.наук, доцент каф. радиофизики и электроники;

Бахов В.А., магистрант каф. радиофизики и электроники

Поступила в редакцию 27 ноября 2008 г.