

Импульсные исследования диодных структур на основе кремний-водородных пленок

© С.В. Белов, А.А. Лебедев

Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе Российской академии наук, 194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 17 декабря 1997 г. Принята к печати 23 декабря 1997 г.)

В представленной работе исследовались диодные структуры Ме–кремний-водородная пленка–Si. Основные особенности проведенных измерений состоят в том, что, во-первых, использована методика двоек импульсов напряжения прикладываемых к образцу и, во-вторых, измерения проведены в температурном диапазоне от 294 К до 334 К. Сопоставление полученных результатов с данными предыдущей работы позволило сделать достоверные оценки основных характеристик кремний-водородных пленок, таких как дрейфовая подвижность, концентрация ловушек, их энергия ионизации, сечение захвата носителей тока.

Введение

Кремний-водородные пленки (КВП) — это материал, родственник пористому кремнию. Интерес к КВП значительно возрос после обнаружения в 1992 г. R.W. Fathauer с сотрудниками фотолюминесценции в видимой области спектра [1]. В том же году наблюдалась электролюминесценция в структурах Ме–КВП–Si [2]. В 1993 г. были изготовлены и исследованы фотодиоды с чувствительностью в интервале от 1.1 до 4.2 эВ [3]. Однако электрические свойства КВП изучены сравнительно слабо. Пленки по своим свойствам представляют собой высококоомный полупроводник с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3.9$ [4]. Исследование статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) диодных структур показало, что они удовлетворительно описываются на основе теории токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ) при наличии ловушек [5,6]. Напряжение резкого роста тока J — порядка 0.4 ÷ 1.0 В и вычисленная из него концентрация ловушек составляет $10^{16} \div 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Вычисленная из ВАХ подвижность носителей тока порядка $10^{-4} \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$.

Образцы и методы измерения

КВП получают путем химического травления кремния в HF с добавлением окислителей (HNO_3 , NaNO_2). За 10 ÷ 60 с образуются пленки толщиной $L = 0.05 \div 0.20 \text{ мкм}$. Спектры их фотолюминесценции показаны на рис. 1.

Диоды создавали напылением Al, Au или Ag через маску с отверстиями диаметром 0.5 ÷ 2.0 мм. Омические контакты к Si изготавливали заранее путем диффузии P. Структуры имели диодные ВАХ с напряжением пробоя > 10 В и обратными токами порядка нескольких мкА.

Измерения переходных токовых характеристик диодов $J(t)$ производили в прямом направлении при воздействии двоек импульсами с одинаковыми и разными амплитудами напряжения U_1 и U_2 (рис. 2).

Результаты измерения и обсуждение

После включения импульса напряжения ток через диод быстро (за время $t_1 \approx 0.1 \text{ мкс}$) нарастает до максимального значения J_{m1} и затем спадает. Нарастание тока связано с пролетом свободных носителей тока через КВП, спад J — с захватом носителей тока на ловушки. Из времени нарастания можно оценить дрейфовую подвижность носителей

$$\mu = \frac{L^2}{t_1 U} \approx 10^{-3} \div 10^{-4} \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}, \quad (1)$$

где U — напряжение на диоде. Эти значения μ хорошо согласуются с результатами работы [6].

Оценим по порядку величины концентрацию свободных носителей тока n . При полевом переносе ток в

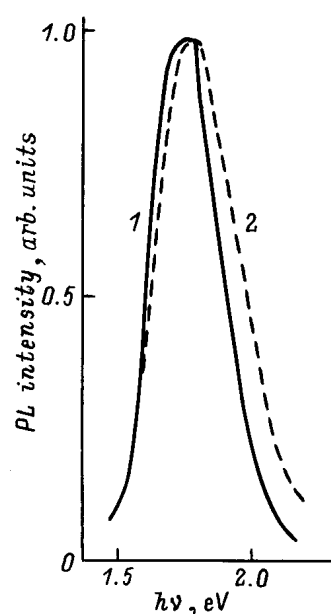


Рис. 1. Типичный спектр фотолюминесценции (PL) исследованных образцов КВП при 300 К (1) и 77 К (2).

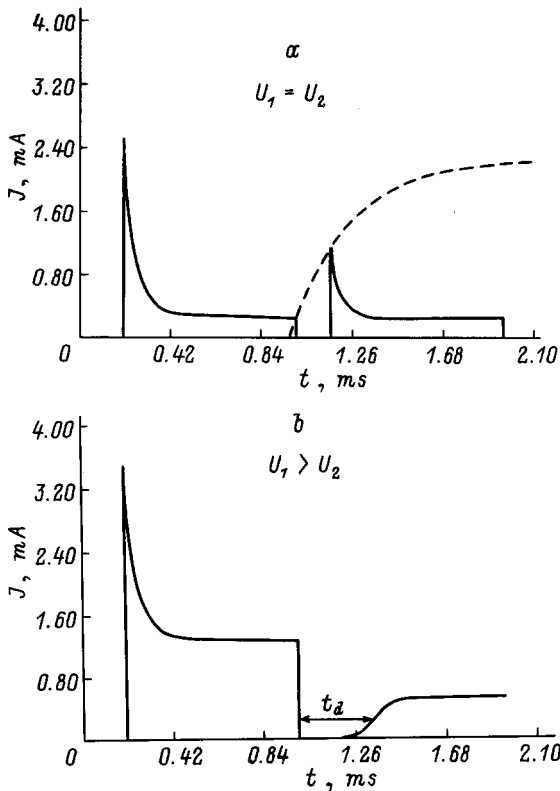


Рис. 2. Осциллограммы импульса тока типичного образца при одинаковых (а) и различных (b) напряжениях первого (U_1) и второго (U_2) импульсов.

начальный момент $J = q\mu nE$, и

$$Jt_1 = q\mu En \frac{L}{E\mu} \rightarrow n \approx \frac{Jt_1}{qL}, \quad (2)$$

где E — электрическое поле, q — заряд электрона. Подставив в формулу (2) типичные значения $J = 2 \text{ А/см}^2$, $t_1 = 10^{-7} \text{ с}$, $L = 10^{-5} \text{ см}$, получаем $n \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

Спад тока обусловлен захватом носителей на ловушки и происходит в условиях больших электрических полей ($E \approx 10^5 \text{ В/см}$) и при изменении концентрации носителей. Однако начальный участок спада можно аппроксимировать экспонентой (рис. 3) с постоянной времени $\tau_0 = (\sigma v_T n)$, где σ и v_T — сечение захвата и тепловая скорость носителей соответственно; $\tau_0 = 10 \div 50 \text{ мкс}$ и не зависит от T . Из τ_0 можно оценить σ , которое оказалось порядка $10^{-19} \div 10^{-20} \text{ см}^2$ для разных образцов.

За время 1-го импульса прямого тока происходит заполнение ловушек в КВП, а после его окончания ловушки термически опустошаются от захваченных носителей. Этот процесс можно исследовать с помощью сдвинутых импульсов напряжения [7]. Рассмотрим сначала случай, когда амплитуды обоих импульсов одинаковы и Δt — интервал времени между концом 1-го импульса и началом 2-го. С ростом Δt часть ловушек успевает термически освободиться от захваченных носителей и ток на переднем фронте 2-го импульса напряжения J_{m2} растет. На

рис. 2, а огибающая зависимости $J_{m2}(\Delta t)$ показана штриховой линией. Разность $\Delta J_m = (J_{m1} - J_{m2})$ на начальном участке можно аппроксимировать экспонентой. На рис. 4 показана зависимость $\lg \Delta J_m = f(\Delta t)$ при нескольких T . Постоянная времени генерации носителей τ_0 связана с параметрами ловушки известным соотношением [8]

$$\tau_g = (v_T \sigma N_c)^{-1} \exp(E_t / v_T), \quad (3)$$

где N_c — эффективная плотность состояний в ближайшей разрешенной зоне. Зависимость Аррениуса для τ_g линейна (рис. 5), и определенная из нее энергия активации ловушек $E_t \approx 0.2 \pm 0.02 \text{ эВ}$. Сечения захвата носителей, вычисленные по формуле (3) в предположении, что $E_t = 0.2 \text{ эВ}$, $N_c = 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и $\tau_g = 10^{-4} \text{ с}$, оказались порядка $10^{-19} \div 10^{-20} \text{ см}^2$ и хорошо согласуются с данными, полученными из кинетики захвата носителей на ловушки.

Рассмотрим теперь случай, когда напряжение 2-го импульса U_2 меньше напряжения 1-го импульса. При определенном значении U_2 возможна ситуация, когда в

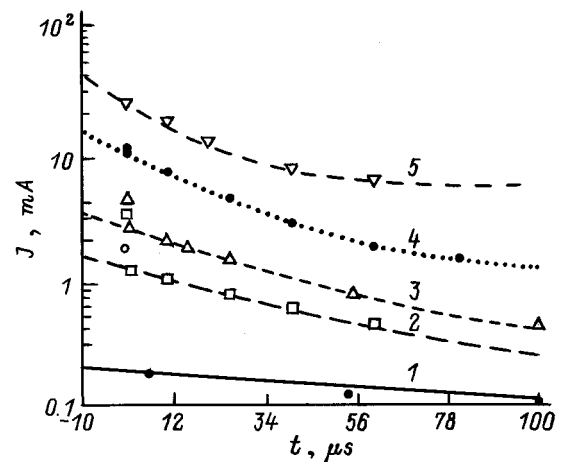


Рис. 3. Временные зависимости спада токового импульса при различных напряжениях на образце U , В: 1 — 1, 2 — 1.6, 3 — 2, 4 — 4, 5 — 7. $T = 294 \text{ К}$.

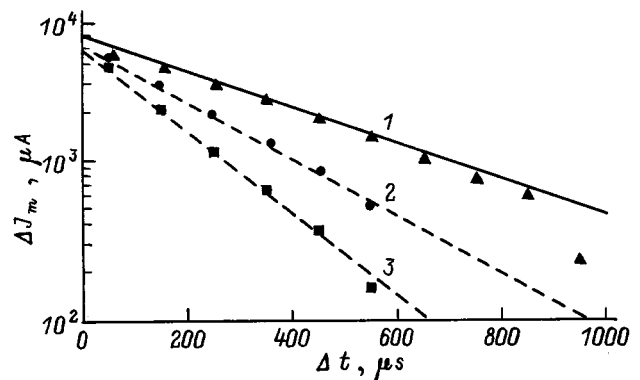


Рис. 4. Зависимость $\Delta J_m = f(\Delta t)$ при температуре T , К: 1 — 294, 2 — 315, 3 — 334.

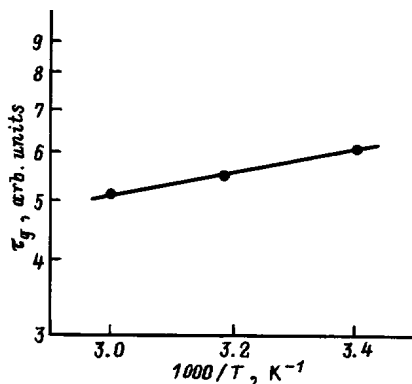


Рис. 5. Зависимость Аррениуса для постоянной времени термической генерации τ_g .

начале 2-го импульса, даже когда 2-й импульс напряжения вплотную приближен к 1-му, прямой ток практически отсутствует, а затем через время t_d , которое равно интервалу времени между концом 1-го импульса и началом роста тока, происходит рост прямого тока (рис. 2, б). Такой вид переходной характеристики со ступенькой тока связан с захватом инжектированных носителей на ловушки и формированием в КВП внутреннего электрического поля, которое в начальный момент импульса может быть больше внешнего поля и препятствовать прохождению тока через диод. По мере термической генерации носителей с ловушек внутреннее поле уменьшается и становится возможным протекание прямого тока. Эксперименты показали, что t_d не зависит от того, приложено ли к КВП внешнее поле или нет, т. е. t_d одинаково в случаях, когда 2-й импульс напряжения вплотную приближен к 1-му импульсу и когда его начало смещено на время t_d .

Из напряжения 2-го импульса, при котором наблюдается описанная выше переходная характеристика, можно оценить концентрацию заряженных ловушек N_t . Нам известно распределение ловушек в КВП и степень их заполнения при инжекции, но если предположить, что заполнение ловушек не зависит от координаты, перпендикулярной плоскости КВП, то из уравнения Пуассона следует

$$N_t \approx \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 U}{qL^2}, \quad (4)$$

где ε_0 — электрическая постоянная. Если в формулу (4) подставить известные значения $U \approx 1$ В, $L = 10^{-5}$ см, $\varepsilon = 3.9$ [4], то $N_t \approx 4 \cdot 10^{16}$ см⁻³.

Величина t_d зависит от T , и из нее можно вычислить энергию активации ловушек E_a . Усредненная по нескольким образцам $E_a = 0.21 \pm 0.08$ эВ и хорошо согласуется с приведенными выше значениями E_t .

Таким образом, из статических и импульсных измерений структур Me-KВП-Si можно сделать следующие оценки характеристик КВП: дрейфовая подвижность $\mu = 10^{-3} \div 10^{-4}$ см²/В·с; концентрация

ловушек $N_t = 10^{16} \div 10^{17}$ см⁻³; их энергия ионизации $E_a = 0.20 \pm 0.03$ эВ; сечение захвата на них $\sigma = 10^{-19} \div 10^{-20}$ см².

Заключение

Следует отметить, что диоды Me-KВП-Si имеют сложную структуру и она пока еще исследована недостаточно. На границе КВП-Si образуется гетеропереход, причем, если исходить из спектров фотолюминесценции КВП, ширина запрещенной зоны КВП не меньше $1.7 \div 1.9$ эВ. В пленке возможны включения наноразмерных кремниевых кластеров с увеличенной шириной запрещенной зоны. Между такими кластерами может находиться вещество другой природы. На границе кластер-окружающее его вещество могут образовываться поверхностные состояния. Они могут также образовываться на границе КВП-Si и КВП-металл. Поэтому сделанные оценки являются весьма усредненными и в реальных структурах механизм токопереноса через КВП более сложный, чем рассмотренная выше упрощенная модель.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ.

Список литературы

- [1] R.W. Fathauer, T. George, A. Ksendsov, R.P. Vasquez. Appl. Phys. Lett., **60**, 995 (1992).
- [2] С.В. Белов. Письма ЖТФ, **18**, вып. 24, 16 (1992).
- [3] Е.В. Астрова, С.В. Белов, О.А. Зайцев, А.А. Лебедев. Письма ЖТФ, **19**, вып. 24, 50 (1993).
- [4] Е.В. Астрова, С.В. Белов, А.А. Лебедев. ФТП, **28**, 332 (1994).
- [5] М. Ламперт, П. Марк. *Инжекционные токи в твердых телах* (М., Мир, 1973).
- [6] С.В. Белов, О.А. Зайцев, А.А. Лебедев. Письма ЖТФ, **21**, вып. 3, 30 (1995).
- [7] Л.М. Капитонова, А.А. Лебедев, Н.А. Султанов. ФТП, **4**, 1130 (1970).
- [8] Л.С. Берман, А.А. Лебедев. *Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках* (Л., Наука, 1981).

Редактор Л.В. Шаронова

Pulse study of silicon-hydrogen film-based diode structures

S.V. Belov, A.A. Lebedev

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia