

СТАЦИОНАРНЫЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУР МЕТАЛЛ-КРЕМНЕВОДОРОДНАЯ ПЛЕНКА-КРЕМНИЙ

С.В.Белов, О.А.Зайцев, А.А.Лебедев

Кремневодородные пленки (КВП) известны более 30 лет [1]. Они были получены в 1960 году в результате обработки монокристаллического кремния в водном растворе $\text{HF} + \text{HNO}_3$. Исследование спектров ИК поглощения КВП показали наличие в них связей Si-H — этим и объясняется их название [2]. За рубежом КВП известны под названием "stain etched films" [3]. КВП нашли некоторое применение для определения положения $p-n$ перехода, для декорирования дефектов на поверхности, активации процессов осаждения металлов, для пассивации поверхности. Однако со временем интерес к ним заметно снизился, так как для решения указанных задач были найдены более эффективные способы. Интерес к КВП вновь значительно возрос после сообщения R.W. Fathauer с соавторами об обнаружении видимой фотолюминесценции (ФЛ) этих пленок [3]. Впоследствии в структурах металл-КВП-кремний была обнаружена электролюминесценция (ЭЛ) [4] и высокая фоточувствительность в видимой и ультрафиолетовой областях спектра [5]. Однако вольт-амперные характеристики диодных структур, содержащие КВП, практически не исследованы. Этому вопросу и посвящена данная работа.

Для изготовления образцов использовались пластины монокристаллического кремния с ориентацией $\langle 111 \rangle$ и $\langle 100 \rangle$, толщиной 0.25–0.4 мкм и удельным сопротивлением 0.5–40 Ом·см. Для создания омических контактов обратную сторону пластин дополнительно легировали фосфором или бором в зависимости от типа проводимости. Формирование КВП осуществлялось путем травления поверхности пластин в водном растворе 48% HF с добавлением небольшого количества 70% HNO_3 . Толщина слоя КВП (от 0.05 до 0.5 мкм) и его внешний вид сильно зависели от состава и времени обработки (от 10 с до 2 мин). Спектры ФЛ не отличались от исследованных ранее [4,5].

Диодные структуры изготавливались путем термического напыления на поверхность КВП слоя Au, Ag или Al через

маску с диаметром отверстий 0.4–2 мм. Омические контакты на обратной стороне подложки получали напылением Al или химическим осаждением Ni. Полученные таким образом структуры имели диодные ВАХ, причем знак выпрямления был таким же, как и для диодов с соответствующим типом проводимости подложки. В обратном направлении диоды имели пробивное напряжение от 20 до 150 В и темновые токи при малых обратных смещениях ($V, 4$ В) порядка 1–5 мкА. В фотодиодном режиме структуры имели высокую фоточувствительность [5].

Как показали предварительные исследования, КВП являются довольно хорошим диэлектриком с удельным сопротивлением порядка 10^8 Ом/см и относительной диэлектрической постоянной $n = 3.9$ [6]. Поэтому при большой толщине пленки L ВАХ диодов подобны ВАХ МДП структур, т. е. сквозные токи через них малы. В исследованных в этой работе структурах L было мало (около 0.1 мкм) и для многих приборов ВАХ хорошо описываются теорией токов, ограниченных пространственным зарядом (ТОПЗ) с ловушками для носителей тока [7]. Для расчета прямых ВАХ мы использовали простейшую модель моноэнергетических ловушек с энергией ионизации E . В этом приближении распределение электрического поля E в базе диода при условии, что при $T \rightarrow 0$ уровни ловушек пусты и всегда $E = 0$ при $X = 0$, может быть вычислено из формулы

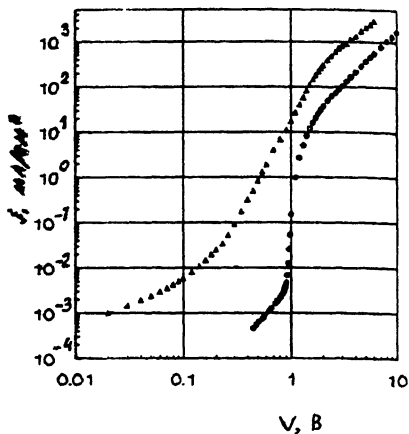
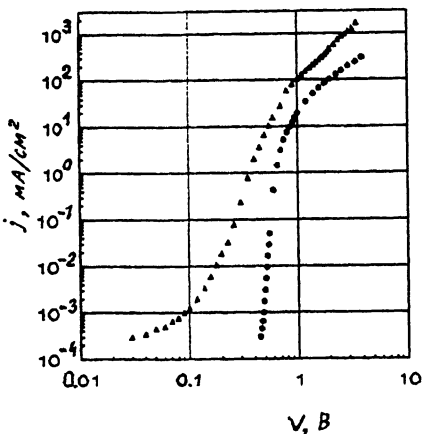
$$\frac{1}{2} \left(\frac{E}{E_0} \right)^2 + \frac{j}{j_M} \frac{M}{n_1} \frac{E}{E_0} - \left(\frac{j}{j_M} \right) \frac{M}{n_1} \ln \left(\frac{E}{E_0} \frac{j_M}{j} + 1 \right) = \frac{j(M/n_1 + 1)x}{\epsilon \epsilon_0 \mu E_0^2 L}, \quad (1)$$

где E_0 — произвольно взятое значение E , j — плотность протекающего тока, M — полная концентрация ловушек, ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая постоянная вакуума, $j_M = j\mu(M + n_1)E_0$, q — заряд электрона, u — подвижность носителей тока, $n_1 = N_c \exp(-E_a/kT)$, N_c — эффективная концентрация уровней в разрешенной зоне.

Формула (1) справедлива при любой температуре. Полное напряжение на структуре равно

$$V = \int_0^L E(x) dx. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) следует, что в указанных приближениях ВАХ имеет три характерных участка: резкого, на



Стационарные вольт-амперные характеристики структур металл-кремневодородная пленка-кремний при различной температуре.

I — $T = 293$ К, *II* — $T = 77$ К; *a* — образец *n*-типа, $S = 0.002$ см², *b* — образец *p*-типа, $S = 0.0011$ см².

несколько порядков, роста j при почти постоянном напряжении V_T и два участка с квадратичной ВАХ $j \approx V$ при $V < V_T$ и $V > V_T$ [7].

Типичные экспериментальные ВАХ для x диодов с разным типом проводимости Si приведены на рис. 1. Из рисунка видно, что ВАХ исследованных диодов удовлетворительно согласуются с теорией. Участки резкого роста тока хорошо прослеживаются при $T = 77$ К. Квадратичная зависимость $j \approx V$ выполняется не всегда, но следует иметь в виду, что КВП являются достаточно сложным объектом, структура и состав которого пока еще однозначно не установлены. Скорее всего, КВП является своеобразным конгломератом с включениями в пленку наноразмерных кристаллитов кремния [8]. Предположение, заложенное в теорию, о равномерном по объему распределении ловушек выполняется, вероятно, далеко не всегда. Кроме того, на границах Si-КВП и КВП-металл существуют барьеры, которые могут ограничивать эмиссию носителей тока в КВП. На этих же границах может быть высокая плотность поверхностных состояний.

Тем не менее, по характерным точкам ВАХ мы оценили некоторые параметры структуры.

Из значения $V_T \approx qML^2/\epsilon\epsilon_0$ [7] можно оценить среднюю концентрацию ловушек M . Расчеты показали, что в исследованных структурах она порядка $5 \cdot 10^{16} - 5 \cdot 10^{17}$ см⁻³. Расчет сделан для пленок с $L = 0.05$ мкм и $\epsilon = 4$.

Из ВАХ при $V > V_T$

$$J \approx \frac{9}{8} \varepsilon \varepsilon_0 u \frac{V^2}{L^3}$$

можно оценить эффективную подвижность u . При тех же значениях l и $\varepsilon \mu \approx 4 \cdot 10^{-4}$ см²В·с. Подвижность такого порядка наблюдается в аморфном гидрогенизированном кремнии [9].

Таким образом, из экспериментальных данных следует, что мы имеем дело с достаточно сложным случаем наложения нескольких механизмов в диодной структуре с двумя барьерами и слоем широкозонного полупроводника (КВП) с неизвестной системой энергетических уровней. Поэтому объяснение ВАХ только токами, ограниченными пространственным зарядом, не совсем корректно, хотя и удовлетворительно описывает основные экспериментальные зависимости. Оценки концентрации и эффективной подвижности носителей тока позволяют в будущем разработать адекватную модель ВАХ таких структур.

Список литературы

- [1] Archer R.J. // J. Phys. Chem. Solids. 1960. V. 14. P. 104.
- [2] Логинов Б.Б., Гайдаенко В.П. // Журнал прикладной спектроскопии. 1979. Т. 31. С. 136.
- [3] Fathauer R.W. et al. // Appl. Phys. Lett. 1992. V. 60. P. 995.
- [4] Белов С.В. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 24. С. 16.
- [5] Белов С.В., Зайцев О.А., Лебедев А.А. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 24. С. 50–53.
- [6] Астрова Е.В., Белов С.В., Лебедев А.А. // ФТП. 1994. Т. 28. В. 2. С. 203–206.
- [7] Ламперт М., Марк П. Инжекционные токи в твердых телах. Пер. с англ. М.: Мир, 1973. 416 с.
- [8] Veale M.I.J. et al. // J. Cryst. Growth. 1986. V. 75. С. 408.
- [9] Аморфные полупроводники и приборы на их основе // Под ред. И. Хамакавы. М.: Металлургия, 1986. 376 с.

Физико-технический
институт им.А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
28 ноября 1994 г.