## УДК 621.315.592

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ состояний в аморфном гидрированном кремнии методом ЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИИ ЕМКОСТИ БАРЬЕРА ШОТТКИ

## Р. В. Прудников

(кафедра общей физики для химического факультета)

Показано, что кривые частотной дисперсии емкости барьера Шоттки на аморфных полупроводниках можно использовать для расчета распределения плотности электронных локализованных состояний в запрещенной зоне. Показано удовлетворительное согласие полученных результатов с известными из литературы.

Барьеры Шоттки на основе аморфного гидрированного кремния (a—Si:H)широко используются в фотопреобразователях солнечной энергии. КПД этих приборов в значительной мере зависит от плотности локализованных электронных состояний (ЛЭС) и их распределения по ширине запрещенной зоны. Последнее обусловливает вид кривых частотной дисперсии емкости (ЧДЕ) барьера Шоттки на основе а—Si: Н. Ясно, что в экспериментальных кривых ЧДЕ заложена информация о распределении плотности ЛЭС. Между тем извлечь эту информацию на практике оказывается не очень просто. Дело в том, что разработанные теоретические расчеты (см., напр., [1-4]) позволяют получать распределение ЛЭС по ширине запрещенной (см., напр., 11—41) позволяют получать распределение тос по ширине запрещенной зоны, используя метод CV-характеристик для равновесных кривых ЧДЕ. Однако-в эксперименте область равновесня на кривых ЧДЕ наблюдается, как правило, на сверхнизких частотах (10<sup>-3</sup> Гц и ниже), что вызывает большие трудности при изме-рениях емкости. По этой причине авторы [3, 4] с целью расширения диапазона из-мерений ЛЭС прибегают к измерению кривых ЧДЕ при повышенных температурах. В дашией работо проядомоси, способ обслебстви систомистически и при на В данной работе предложен способ обработки экспериментальных кривых ЧДЕ, измеренных при комнатных температурах, с тем чтобы получать распределение ЛЭС, соответствующее области сканирования по частоте.

Пленки a-Si: Н n-типа толщиной 0,8 мкм наносились на покрытые тонким слоем хрома подложки из ситалла при разложении моносилана в тлеющем ВЧ-разряде. Для формирования барьера Шоттки сверху напылялся палладиевый электрод общей площадью ~7,25 10<sup>-2</sup> см<sup>2</sup>. Высота барьера (0,9÷0,95 эВ) оценивалась по температурной зависимости обратной ветви вольт-амперной характеристики. Положение уровня Ферми в объеме (Е = 0,35 эВ от края зоны проводимости) вычислялось из температурной зависимости проводимости при величине температурного едвига 2·10-4 эВ·К-1. Емкость при нулевом смещении измерялась мостом полных проводимостей со световым трансформатором [5], а также методом фазового выделения адмитанса [6]. Все измерения проводились в вакууме 10-3 Па при температуре 293 К. Предварительно все образцы прогревались при 450 К в течение 15 мин.

На рис. 1 приведена типичная кривая ЧДЕ одного из образцов, изготовленного по указанной выше технологии. Теоретическая обработка этой кривой осуществляпо указанной выше технологии. теорети технол соргание и по в по в технологии технол ной за ЧДЕ является дисперсия времен перезарядки ЛЭС. При этом емкость барьера С, зависящая от частоты ю, рассматривается состоящей из двух последовательно включенных емкостей:

$$C(\omega)^{-1} = C(\psi_c)^{-1} + C_{x_c}(\psi_s, \psi_c)^{-1}, \qquad (1)^n$$

где C(ψ<sub>c</sub>) — емкость слоя перезаряжающихся ЛЭС, ψ<sub>c</sub> — величина потенциала, докоторого происходит перезарядка ЛЭС. Согласно [1],

$$e | \psi_c = kT \ln \frac{1}{\omega \tau_0} - E_F,$$

где  $\tau_0 = 10^{-14}$  с — эмпнрический параметр,  $E_F$  — энергия уровня Ферми. Емкость  $C_{x_c} = \epsilon \epsilon_0 / X_c$  определяется глубиной слоя  $X_c$ , в котором перезарядка: ЛЭС отсутствует:

$$X_{c} = \int_{\psi_{c}}^{+s} \frac{d\psi}{Q(\psi)}, \qquad (2)$$

где  $\psi_s$  — поверхностный потенциал,  $Q(\psi)$  — плотность заряда ЛЭС для данного потенциала  $\psi$ .

Запищем известное выражение для Q, определяемое величинами  $\psi_c$  и распределением плотности ЛЭС n(E) [1]:

$$Q(\psi_c) = \left(2|e| ee_0 \int_0^{\psi_c} \int_{E_F}^{E_F} n(E) dE d\psi\right)^{1/2}.$$
(3)

Используя (3), можно получить распределение плотности ЛЭС относительно энергии уровня Ферми, соответствующее области сканирования по частоте ω, т. е. диапазону изменений потенциала ψ<sub>c</sub>:

$$n\left(E_{F}-|e||\psi_{c}\right) = \frac{1}{|e|\varepsilon\varepsilon_{0}} \left[ \left(\frac{dQ}{d\psi_{c}}\right)^{2} + Q\frac{d^{2}Q}{d\psi^{2}} \right] = \frac{1}{|e|\varepsilon\varepsilon_{0}} \left[ C\left(\psi_{c}\right)^{2} + \int_{0}^{\psi_{c}} C\left(\psi\right) d\psi \frac{dC\left(\psi_{c}\right)}{d\psi_{c}} \right].$$

$$(4)$$



Рис. 1. Зависимость емкости барьера Шоттки на основе a—Si:H от частоты:  $E_F$ = = 0,35 эВ,  $\psi_s$ =0,6 В



Из (4) видно, что расчет распределения плотности ЛЭС сводится к вычислению емкости  $C(\psi_c)$  при данной частоте  $\omega$  из кривой ЧДЕ, определяемой формулой (1). Эту задачу можно решать разными способами. В данной работе  $C(\psi_c)$  аппроксимировалась функцией вида  $C(\psi_c) = A \exp(b\psi_c)$ , где параметры A и b в общем случае зависят от  $\psi_c$ .

Из (1) и (2) следует

$$C(\omega) = \frac{A}{\exp(-b\psi_c) + \ln \frac{\exp(b\psi_c) \left[\exp(b\psi_s) - 1\right]}{\exp(b\psi_s) \left[\exp(b\psi_c) - 1\right]}}.$$
(5)

Из (4), (5) имеем

$$n \left( E_{F} - |e| \psi_{c} \right) = \frac{c^{2} \left( \omega \right)}{|e| \varepsilon \varepsilon_{0}} \left\{ \exp \left( -b\psi_{c} \right) + \ln \frac{\exp \left( b\psi_{c} \right) \left[ \exp \left( b\psi_{s} \right) - 1 \right]}{\exp \left( b\psi_{s} \right) \left[ \exp \left( b\psi_{c} \right) - 1 \right]} \right\}^{2} \times \exp \left( b\psi_{c} \right) \left[ 2\exp \left( b\psi_{c} \right) - 1 \right].$$
(6)

Параметр *b* для данного  $\psi_c$  можно найти, продифференцировав (5) по  $\psi_c$ . После несложных преобразований получаем уравнение относительно параметра *b*:

$$\frac{C'(\psi_c)}{C(\psi_c)} \frac{\left[\exp\left(b\psi_c\right) - 1\right]}{b\left[2 - \exp\left(-b\psi_c\right)\right]} \left\{ \exp\left(-b\psi_c\right) + \ln\frac{\exp\left(b\psi_c\right)\left[\exp\left(b\psi_s\right) - 1\right]}{\exp\left(b\psi_s\right)\left[\exp\left(b\psi_c\right) - 1\right]} \right\} = 1. (7)$$

С использованием численного решения уравнения (7) по формуле (6) была рассчитана плотность ЛЭС из кривой ЧДЕ (см. рис. 1). Результаты расчета представлены на рис. 2. Там же приведены данные работы [7], полученные для аналогичных образцов, но другим способом. Видно, что результаты удовлетворительно согласуются. Следовательно, предложенный способ обработки экспериментальных кривых ЧДЕ можно использовать для расчета ЛЭС в аморфных полупроводниках.

Автор выражает глубокую благодарность В. Ф. Киселеву и С. Н. Козлову за ценные замечания при обсуждении результатов данной работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Abram R. A., Doherty P. J.//Phil. Mag. 1982. **B45**. P. 167. [2] Archibald J. W., Abram R. A.//Phil. Mag. 1983. **B48**. P. 111, [3] Jousse D., Deleonibus S.//J. Appl. Phys. 1983. **54**. P. 4001. [4] Misra D. S., Kumar A., Agarwal S. C.//J. Non-Cryst. Sol. 1985. **76**. P. 215. [5] Нахмансон Р. С., Ерков В. Г.// //ПТЭ. 1973. № 3. С. 147. [6] Белотелов С. В., Сурис Р. А., Федоров В. Н.// //ПТЭ. 1978. № 1. С. 216. [7] Lang D. V. et al.//Phys. Rev. 1982. **B25**. P. 5285.

Поступила в редакцию 23.03.89