

06;07

## Мониторинг интенсивности люминесценции туннельной МОП-структуры с пространственно неоднородной толщиной диэлектрика

© С.Э. Тягинов, Н. Асли, М.И. Векслер, А.Ф. Шулекин,  
П. Сеегебрехт, И.В. Грехов

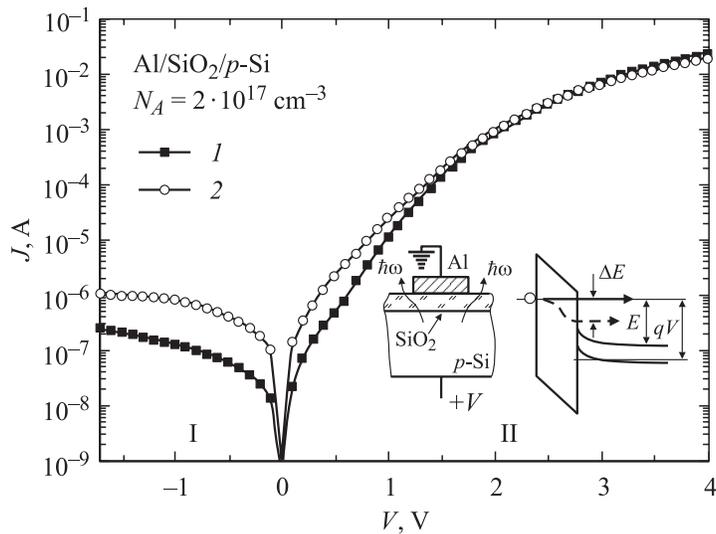
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург  
E-mail: shulekin@mail.ioffe.ru  
Кафедра Полупроводниковой техники  
Технического факультета Университета г. Киля

Поступило в Редакцию 2 декабря 2004 г.

Измерены зависимости интенсивности электролюминесценции туннельной МОП-структуры Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si от времени. Показано, что анализ этих зависимостей в некоторых случаях может дать более точную информацию о состоянии окисла, чем анализ эппор тока.

Стандартным испытанием структур металл–окисел–полупроводник (МОП), в том числе с туннельно-тонким (2–3 nm) слоем SiO<sub>2</sub>, является стресс на постоянном токе  $J$  или постоянном напряжении  $V$  [1,2]. При этом записывается эппора  $V(t)$  или  $J(t)$  соответственно, анализ которой позволяет изучать детали деградации окисла и, в частности, выявлять моменты мягкого пробоя [2].

Однако при достаточно большом напряжении  $V$  на МОП-структуре чисто электрическая диагностика мягкого пробоя может быть несколько осложнена. Действительно, как показано в [3], только при малых  $V$  (порядка 1 V) ток после перегрузки всегда растет. Напротив, при  $V \sim 2\text{--}4\text{ V}$  изменения тока после пробоя возможны и в сторону увеличения, и в сторону уменьшения, поскольку образующиеся дефектные области могут иметь сопротивление как ниже, так и выше туннельного сопротивления этих областей в исходном состоянии. Нетривиальный эффект спада  $J$  выражен при заметной дисперсии толщины SiO<sub>2</sub> [3], когда срыв переноса заряда в самых тонких участках существенен для полного тока. Если допустить, что происходит несколько актов мягкого



**Рис. 1.** Пример вольт-амперных характеристик МОП-структуры Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si. Повреждение окисла привело к прекращению видимой люминесценции данного образца. Вставка: чертеж испытываемой структуры. Для нее  $E \sim qV - E_g$  до повреждения. 1 — новый образец, 2 — поврежденный; I — глубокое обеднение, II — аккумуляция.

пробоя, то локальный спад тока в одном месте, в принципе, может быть скомпенсирован ростом в другом месте образца; при этом измерения  $J(t)$  могут не дать информации о состоянии структуры.

В связи со сказанным может представить определенный интерес привлечение мониторинга интенсивности свечения туннельной МОП-структуры для диагностики мягкого пробоя, так как именно при  $V \sim 3 \text{ V}$  („+“ на подложке) у МОП-диодов с толщиной окисла 20–30 Å наблюдается достаточно интенсивная электролюминесценция [4,5]. Люминесценция связана с релаксацией инжектируемых в Si горячих электронов (вставка в рис. 1). Спектр является достаточно широким, с коротковолновым краем  $\hbar\omega = E + E_g$ , где  $E$  — энергия, приобретаемая электронами при инжекции [5]. Форма спектров неповрежденных структур не зависит от толщины SiO<sub>2</sub>,

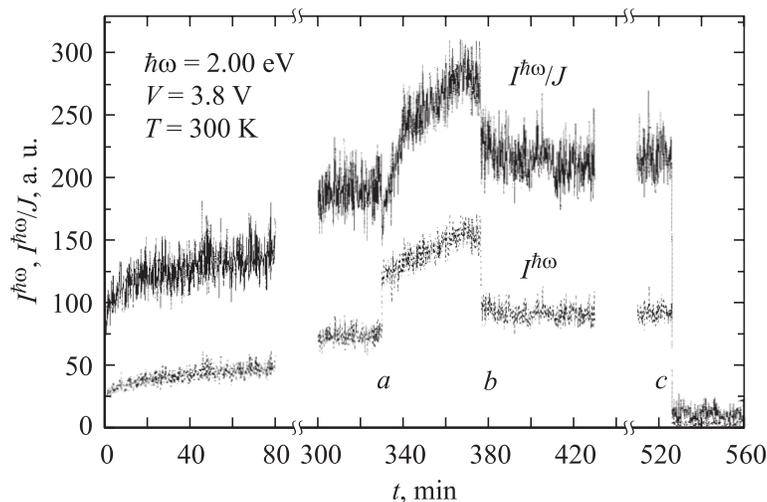
а квантовый выход  $dP_{le}(E, \hbar\omega)/d[\hbar\omega]$  (число фотонов в интервале  $\hbar\omega \dots \hbar\omega + \delta\hbar\omega$ , генерируемых одним горячим электроном) возрастает как функция  $E$  [5]. Повреждение окисла ведет к уменьшению энергии электронов, инжектируемых в дефектной области (вставка на рис. 1), поэтому интенсивность эмиссии фотонов любой заданной энергии  $\hbar\omega$ , отнесенная к току,  $I^{\hbar\omega}/J$ , должна снижаться при повреждении структуры.

Таким образом, если на постоянном смещении  $V$  измерять  $I^{\hbar\omega}(t)$ , то участки резкого спада  $I^{\hbar\omega}/J$  можно интерпретировать как мягкий пробой. Сама эпюра интенсивности  $I^{\hbar\omega}(t)$  при этом заменит традиционную эпюру „ток–время“. Измерения надо проводить в спектральном диапазоне  $E_g \ll \hbar\omega < E + E_g$ . Отметим, однако, что даже сильно поврежденная область может давать вклад в интенсивность при  $\hbar\omega \sim E_g = 1.12 \text{ eV}$ . По этой причине имеет смысл выбирать  $\hbar\omega$  ближе к коротковолновому краю.

Для апробации предложенного метода мониторинга интенсивности были использованы образцы туннельных МОП-диодов Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si (вставка на рис. 1) с номинальной толщиной окисла 25 Å и среднеквадратичным отклонением толщины  $\sigma_d \sim 3\text{--}4 \text{ Å}$ . Такая неоднородность, по современным понятиям, считается большой [6], но образцы демонстрировали качественно удовлетворительные воспроизводимые электрические характеристики (рис. 1). Круглые Al контакты (площади  $\sim 10^{-3} \text{ cm}^2$ ) были непрозрачны, так что зона сбора света ограничивалась периметром. Измерения  $I^{\hbar\omega}$  проводились на высокочувствительной установке для регистрации спектров излучения МОП-структур, описанной в [7].

Предварительно укажем, что в использованных образцах МОП-диодов довольно часто отмечалось исчезновение видимой люминесценции при перегрузке. При этом вольт-амперные характеристики не претерпевали радикальных изменений, сохраняя, в частности, асимметрию прямой и обратной ветвей (рис. 1). Это простое наблюдение свидетельствует в пользу предположения о том, что мониторинг интенсивности может быть более чувствительным методом контроля состояния структуры, чем мониторинг тока.

На рис. 2 представлен пример записи интенсивности света на длине волны  $\lambda = 620 \text{ nm}$  ( $\hbar\omega = 2.00 \text{ eV}$ ). На этом же рисунке кривые перестроены в виде  $I^{\hbar\omega}(t)/J(t)$ . Наблюдаются как плавные, так и резкие изменения  $I^{\hbar\omega}$  со временем. Плавные связаны с нарастанием



**Рис. 2.** Наиболее интересные фрагменты эпюр интенсивности люминесценции  $I^{\hbar\omega}(t)$  структуры Al/SiO<sub>2</sub>/p-Si и те же эпюры после деления на ток  $I^{\hbar\omega}(t)/J(t)$ .  $a, b, c$  — акты мягкого пробоя (в момент  $a$  имел место рост тока  $J$ , в момент  $b$  — снижение, в момент  $c$  — слабый рост в пределах нескольких процентов).

туннельного тока, происходящим вследствие генерации и перезарядки поверхностных состояний, в особенности сразу после подачи напряжения на образец. Количественно изменения интенсивности при этом несколько сильнее изменений тока ( $I^{\hbar\omega}/J$  увеличивается); такое поведение обусловлено тем, что при деградации ток на периферии растет быстрее, чем в среднем по структуре, а именно из периферийной зоны собирается свет.

Скачкообразные изменения на рис. 2, как представляется, обусловлены пробоем. Отметим, что скачки  $I^{\hbar\omega}$  имеют место как вверх, так и вниз, а скачки  $I^{\hbar\omega}(t)/J(t)$  — только вниз. Спад отношения  $I^{\hbar\omega}/J$  происходил вне зависимости от того, приводил ли соответствующий акт мягкого пробоя к росту (как в момент „ $a$ “, рис. 2) или спаду (момент „ $b$ “) тока. Скачок „ $a$ “ величины  $I^{\hbar\omega}(t)/J(t)$  вниз несколько затухеван последующим плавным ростом. В момент „ $c$ “ произошел почти полный срыв люминесценции, возможность которого упоминалась ранее.

Похожий результат был получен и при измерениях ближе к синему краю ( $\hbar\omega = 3.02$  eV), которые, однако, осложнялись низкой интенсивностью свечения.

Таким образом, в данном сообщении предложен и опробован метод контроля состояния окисла туннельной МОП-структуры, основанный на мониторинге интенсивности ее электролюминесценции, наряду с контролем тока. Записи изменений интенсивности не менее информативны, чем традиционные эпюры тока. Метод может представлять интерес при измерениях на относительно высоких напряжениях при наличии пространственной неоднородности толщины окисла.

Авторы благодарны ГНТП „ФТНС“, Программе президента РФ поддержки научных школ (грант НШ–758.2003.2), фонду Дж. Сороса и фонду „Содействия отечественной науке“.

## Список литературы

- [1] *Degraeve R.* Reliability of Ultra-Thin Oxide Gate Dielectrics (tutorial) // 9<sup>th</sup> European Symposium on Reliability of Electron Devices, Failure Physics and Analysis. Leuven, IMEC, 1998.
- [2] *Houssa M., Vandewalle N., Nigam T., Ausloos M., Mertens P.W., Heyns M.M.* // IEDM Tech. Dig. 1998. P. 909–912.
- [3] *Шулекин А.Ф., Тягинов С.Э., Khilil R., El Hdiy A., Векслер М.И.* // ФТП. 2004. Т. 38. В. 6. С. 753–756.
- [4] *Cartier E., Tsang J.C., Fischetti M.V., Buchanan D.A.* // Microelectron. Eng. 1997. V. 36. P. 103–106.
- [5] *Asli N., Vexler M.I., Shulekin A.F., Seegebrecht P.* // Semicond. Sci. Technol. 2003. V. 18. P. 147–153.
- [6] *Momose H.S., Nakamura S., Ohguro T., Yoshitomi T., Morifuji E., Morimoto T., Katsumata Y., Iwai H.* // IEEE Trans. Electron Devices. 1998. V. ED-45. N 3. P. 691–700.
- [7] *Asli N.* Experimentelle Untersuchung der Elektrolumineszenz von MOS-Tunnelstrukturen. Ph. D. Dissertation. Kiel Univ., Germany, 2004. 156 S.