

ной слоистой структуры, если из наблюдений известны: внешний потенциал такого объекта (например, из наблюдений его спутников), формы границ раздела слоев, а также распределение масс, лежащих только вдоль радиуса над исследуемой точкой.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Дубошин Г. Н. Теория притяжения. М., 1961. [2] Сретенский Л. И. Теория ньютоновского потенциала. М.; Л., 1946. [3] Чуйкова Н. А. // Изв. вузов, Геодезия и аэрофотосъемка. 1980. № 4. С. 54. [4] Чуйкова Н. А. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1984. 25, № 1. С. 22.

Поступила в редакцию  
08.10.90

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1991. Т. 32, № 4

## ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 592.315

### ВЛИЯНИЕ ПЕРЕЗАРЯДКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ НА ТОКИ ЛАВИННОЙ ИНЖЕКЦИИ В СИСТЕМЕ Si—SiO<sub>2</sub>—МЕТАЛЛ

С. Н. Козлов, В. В. Супрунов

(кафедра общей физики и молекулярной электроники)

Исследовано влияние заряжения поверхностных электронных состояний в системе Si—SiO<sub>2</sub> — металл на процесс переноса горячих электронов из кремния в окисный слой при лавинном пробое в кремнии. Показано, что основной механизм такого влияния — «интегральное» изменение электрического поля в области пространственного заряда полупроводника при заряжении поверхностных состояний. Предложен новый метод определения плотности поверхностных электронных состояний, основанный на измерении зависимостей токов лавинной инжекции электронов из полупроводника в диэлектрик от амплитуды импульсов истощающего напряжения.

Лавинная инжекция электронов из кремния в пленку SiO<sub>2</sub> широко используется при изучении электронного захвата на ловушки диэлектрического слоя [1], а также при исследовании закономерностей инжекционно-стимулированного дефектообразования как на границе Si—SiO<sub>2</sub>, так и в слое окисла [2—4]. Несмотря на большое количество работ, в которых затрагиваются в той или иной мере проблемы, связанные с лавинной инжекцией, остаются практически неизученными эффекты, обусловленные влиянием границы раздела полупроводник — диэлектрик на процессы переноса горячих носителей заряда из полупроводника в диэлектрик.

В настоящей работе исследовано влияние перезарядки электронных состояний на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub> на токи импульсной лавинной инжекции электронов из кремния в окисел и на основании полученных результатов предложен новый способ определения плотности электронных состояний на границе Si—SiO<sub>2</sub> (ПС).

В экспериментах использовались МДП-структуры, изготовленные на основе кремния *p*-типа с концентрацией бора  $N_B = 1,5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. Исследовались поверхности (100), термически окисленные в сухом кислороде с добавлением воды; толщина окисного слоя  $d \approx 1000$  Å. В качестве полевых электродов использовался напыленный в вакууме молибден (площадь металлических электродов  $S = 0,01$  см<sup>2</sup>). Измерения плотно-

сти ПС проводились методами квазистатической и высокочастотной вольт-фарадометрии при комнатной температуре. Целенаправленное повышение плотности ПС в исследованных образцах достигалось постепенным увеличением дозы  $D_e$  лавинно-инжекционной деградации МДП-структуры (количества электронов, инжектированных из кремния в окисный слой, в расчете на единицу поверхности кремния) [3]. Лавинно-инжекционная деградация проводилась в импульсном режиме: на затвор подавались импульсы положительного напряжения с амплитудой 50—55 В и длительностью 5 мкс, период повторения импульсов  $T = 10$  мкс, плотность тока в процессе инжекционной деградации поддерживалась постоянной:  $I_0 = 5 \cdot 10^{-6}$  А·см<sup>-2</sup>. Выбранный режим соответствовал однородной по площади МДП-структуры инжекции электронов в окисный слой [5]. Измерения токов лавинной инжекции проводились в режиме с большой скважностью ( $\tau = 5$  мкс,  $T = 350$  мкс) с целью уменьшения деградации структуры в процессе измерений. Доза инжекционной деградации во время измерений не превышала  $D_e = 3 \cdot 10^{14}$  эл·см<sup>-2</sup>.

В исходном состоянии исследованные образцы характеризовались достаточно низкой плотностью ПС в средней части запрещенной зоны кремния:  $N_{ss} \approx 10^{10}$  см<sup>-2</sup>·эВ<sup>-1</sup> (типичный энергетический спектр ПС для МДП-структуры до деградации показан на рис. 1, 1). Соответствующие зависимости тока лавинной инжекции через МДП-структуру в исходном состоянии от амплитуды импульса напряжения  $V_p$  показаны на рис. 2 (1, 1'). При малых  $V_p$  число  $N_e$  горячих электронов, способных пересечь границу за время одного импульса, невелико ( $N_e = 5 \cdot 10^6$  электронов при токе инжекции  $1 \cdot 10^{-9}$  А·см<sup>-2</sup>). Увеличение амплитуды импульса от 40 до 48 В сопровождается ростом тока (и соответственно  $N_e$ ) более чем на три порядка. Очевидно, это возрастание обеспечивается увеличением как коэффициента умножения в лавине, так и энергии горячих электронов. При дальнейшем росте  $V_p > 48-50$  В количество

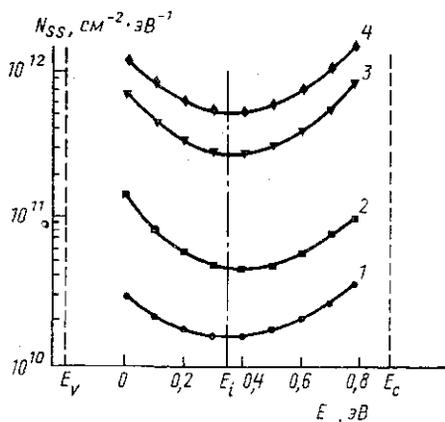


Рис. 1. Зависимости плотности электронных состояний на границе Si—SiO<sub>2</sub> от энергии до (1) и после (2—4) лавинно-инжекционной деградации. Доза деградации  $D_e = 2 \cdot 10^{15}$  (2);  $5 \cdot 10^{16}$  (3);  $5,6 \cdot 10^{17}$  эл·см<sup>-2</sup> (4);  $E_c$ ,  $E_v$ ,  $E_i$  — энергии дна зоны проводимости, потолка валентной зоны и середины запрещенной зоны кремния соответственно

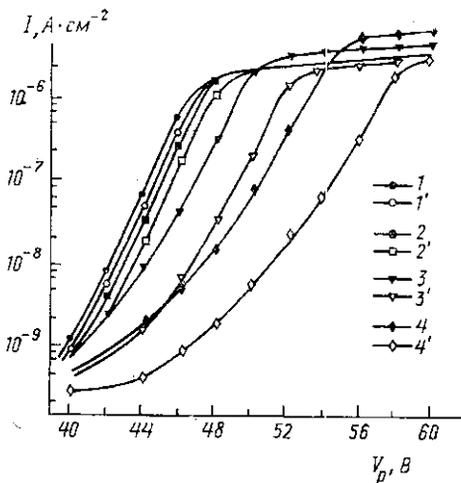


Рис. 2. Зависимости лавинной инжекции электронов из Si в SiO<sub>2</sub> от амплитуды импульсов обедняющего напряжения. Нумерация кривых соответствует рис. 1. Напряжение смещения на затворе  $V_0 = -4$  В (1—4) и +4 В (1'—4')

инжектированных в диэлектрическую пленку за один импульс электронов практически не увеличивается. Это связано с автоторможением лавинного пробоя из-за накопления неосновных носителей заряда (электронов) вблизи границы Si—SiO<sub>2</sub> во время импульса и соответственно снижением электрического поля в истощенном слое кремния [5].

Существенно, что величина тока лавинной инжекции оказалась зависящей от постоянного напряжения смещения  $V_0$ , подаваемого на металлический электрод структуры между импульсами (при разных  $V_0$  максимальное напряжение во время импульса  $V_p$  поддерживалось постоянным). Из рис. 2 видно, что при  $V_0 = -4$  В инжекционный ток ( $I_{(-)}$ ) всегда несколько больше, чем при  $V_0 = +4$  В ( $I_{(+)}$ ) (кривые  $I$  и  $I'$ ). По мере увеличения плотности ПС в результате инжекционной деградации МДП-структуры различие между величинами  $I_{(+)}$  и  $I_{(-)}$  возрастает (см. рис. 1 и 2). Наличие корреляции между плотностью ПС и величиной разности  $I_{(-)}$  и  $I_{(+)}$  свидетельствует о том, что перезарядка ПС оказывает существенное воздействие на процесс переноса электронов через границу раздела полупроводник — диэлектрик. Действительно, при отрицательном напряжении на металлическом электроде ( $V_0 = -4$  В) в приповерхностном слое  $p$ -кремния реализуется сильное обогащение и энергетические уровни всех ПС находятся выше уровня Ферми; при  $V_0 = +4$  В в области пространственного заряда кремния достигается сильная инверсия, при этом энергетические уровни ПС располагаются под уровнем Ферми. Поэтому накопленный на ПС заряд при  $V_0 = -4$  В больше, чем при  $V_0 = +4$  В, на величину  $\Delta Q_{ss} = q\Delta N_{ss}$ ; здесь  $\Delta N_{ss}$  — интегральная плотность перезаряжающихся ПС (в интервале энергий  $\Delta E \approx 0,85$  эВ в средней части запрещенной зоны кремния),  $q$  — величина заряда электрона. Из-за накопления отрицательного заряда на ПС при положительном смещении на затворе ( $V_0 = +4$  В) напряженность электрического поля в истощенном слое кремния во время импульса напряжения оказывается пониженной, что и является причиной уменьшения инжекционного тока.

Возможны два механизма воздействия заряда ПС на лавинную инжекцию электронов из Si в SiO<sub>2</sub> — «локальный» и «интегральный». Локальное действие ПС обусловлено дискретностью их зарядов, которая может быть причиной локальных вариаций напряженности электрического поля в кремнии и высоты энергетического барьера на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub>. При интегральном воздействии систему заряженных ПС можно рассматривать как равномерно заряженную плоскость; изменение заряда ПС вызывает однородное в плоскости границы Si—SiO<sub>2</sub> изменение электрического поля в области пространственного заряда кремния. Во втором случае дополнительное электрическое поле, созданное системой отрицательно заряженных ПС (при  $V_0 = +4$  В), можно «скомпенсировать» увеличением амплитуды импульса на

$$\Delta V_p = qC_I \Delta N_{ss} \quad (1)$$

( $C_I$  — удельная емкость диэлектрика) так, чтобы ток  $I_{(+)}$  стал равным току  $I_{(-)}$ . Отсюда следует, что в условиях, когда преобладает «интегральное» действие ПС, величина  $\Delta N_{ss}$  может быть определена из сдвига зависимостей  $I_{(+)}(V_p)$  и  $I_{(-)}(V_p)$  по оси импульсных напряжений ( $\Delta V_p$ ). При этом величину сдвига следует определять в центральной части указанных зависимостей, где, с одной стороны, напряженность электрического поля достаточно велика для реализации однородного по площади МДП-структуры лавинного пробоя, а с другой — еще не достигается режим «автоторможения» лавины.

Определенные из соотношения (1) величины  $\Delta N_{ss}$  в зависимости от дозы лавинно-инжекционной деградации представлены на рис. 3. На этом же рисунке показаны интегральные плотности ПС, вычисленные для тех же доз деградации из данных рис. 1 (интегрирование проводилось в области энергий от 0 до 0,78 эВ). Наблюдается неплохое соответствие между величинами  $\Delta N_{ss}$ , полученными двумя указанными способами. Некоторое количественное расхождение, по-видимому, связано с тем, что методом лавинной инъекции измеряется плотность ПС в несколько более широком диапазоне энергий, чем CV-методами. Поэтому кривые 1 и 2 на рис. 3 наиболее заметно отличаются при малых  $N_{ss}$ , когда вклад состояний, энергетические уровни которых расположены вблизи разрешенных зон, максимален. Не исключено также, что при малой плотности ПС некоторую роль играют эффекты, связанные с дискретностью распределения зарядов ПС.

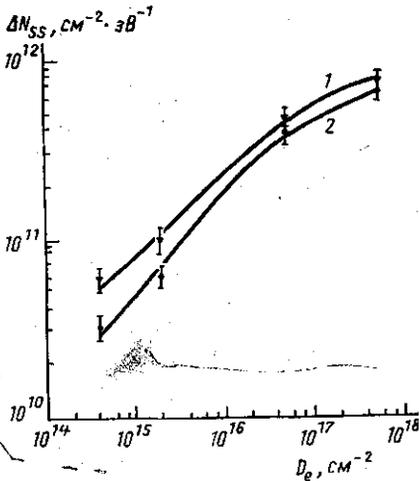


Рис. 3. Зависимости интегральной плотности электронных состояний на границе Si—SiO<sub>2</sub> от дозы лавинно-инжектирующей деградации, полученные лавинно-инжекционным методом (1) и по данным вольт-фарадометрии (2)

Из приведенных данных следует, что при типичных плотностях поверхностных электронных состояний ( $10^{11}$ — $10^{12}$  см<sup>-2</sup>·эВ<sup>-1</sup>) величина интегральной плотности ПС может быть с достаточной степенью точности определена из зависимостей токов лавинной инъекции электронов из полупроводника в диэлектрик от амплитуды импульсного напряжения при двух напряжениях смещения  $V_0$ . Немаловажно, что при использовании аппаратуры, позволяющей измерять токи инъекции порядка  $10^{-15}$ — $10^{-16}$  А, плотность ПС может быть определена в МДП-структурах площадью  $10^{-7}$ — $10^{-8}$  см<sup>2</sup>. Измерение амплитудных зависимостей токов лавинной инъекции при нескольких напряжениях смещения в принципе предоставляет возможность извлечения информации о характере энергетического спектра электронных состояний на границе раздела полупроводник—диэлектрик.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nicollian E. H., Brews J. R. // Metal-Oxide-Semiconductor Physics and Technology. Ch. 11. N. Y., 1982. [2] Hsu C. C., Pan S. C., Sah C. T. // J. Appl. Phys. 1985. 58, N 3. P. 1326. [3] Козлов С. Н., Потапов А. Ю. // Микроэлектроника. 1988. 17, № 5. С. 454. [4] Касумов Ю. Н., Козлов С. Н. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 1989. 30, № 4. С. 73. [5] Козлов С. Н., Потапов А. Ю. Препринт физ. фак. МГУ № 31/1986. М., 1986.

Поступила в редакцию  
24.12.90