СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Гольцман Б. Н., Кудинов В. А., Смирнов И. А.//Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi₂Te₃. М., 1972. [2] Кöhler Н.// //Phys. Stat. Sol. (b). 1976. 74. Р. 591. [3] Ногак Ј., Тichy L.//Phys. Stat. Sol. (a). 1972. 9. Р. 369. [4] Вапdо Н., Oʻshima K., Мапabe М., Suzuki М.// //Solid State Comm. 1982. 43, N 1. Р. 35. [5] Мощалков В. В., Миронова Г. А.//Письма в ЖЭТФ. 1977. 26, № 7. С. 538. [6] Streda P. S.//Сzech. J. Phys. 1983. **B3**3. Р. 49. [7] Аскеров Б. М.//Кинетические эффекты в полупроводниках. Л., 1970. С. 238. [8] Зырянов П. С., Клингер М. И.//Квантовая теория явлений электронного переноса в кристаллических полупроводниках. М., 1976. [9] Галев В. Н., Кульбачинский В. А., Сидоренко Н. А., Скипидаров С. Я., Цветкова Н. А./Физ. низ. температур. 1986. 12, № 6. С. 590. [10] Олешко Е. В., Королышин В. Н.//ФТТ. 1985. 27. С. 2856. [11] Лифшиц И. М., Азбель М. Я., Каганов М. И.//Электронная теория металлов. М., 1971. С. 76. [12] Рашба Э. И., Тимофеев В. Б.//ФТП. 1986. 20. С. 977.

Поступила в редакцию 18.03.88

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1989. Т. 30, № 3

УДК 592.315

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ НА ГРАНИЦЕ SI—SIO₂ При Лавинной инжекции

С. Н. Козлов, А. Ю. Потанов

(кафедра общей физики для химического факультета)

Исследовано влияние перезарядки поверхностных состояний границы раздела Si—SiO₂ на процесс лавинной инжекции электронов. Показано, что рост плотности поверхностных состояний зависит от режима проведения лавинной инжекции.

Известно, что инжекция горячих носителей заряда через границу раздела Si-SiO₂ сопровождается возрастанием плотности электронных состояний на поверхности кремния [1, 2]. Этот эффект привлекает в последние годы большое внимание, поскольку является одной из основных причин деградации МДП-приборов [2]. Весьма актуальна проблема выбора оптимального режима работы элементов микросхем, в которых возможен разогрев носителей заряда до энергий, достаточных для активного воздействия на границу Si-SiO₂. В настоящей работе изучено влияние зарядового состояния центров захвата границы раздела Si-SiO₂ на процесс лавинной инжекции электронов из кремния в окисел и на эффективность дефектообразования в переходном слое Si-SiO₂.

Методика эксперимента. Исследовались структуры Al-SiO₂-Si, изготовленные на основе кремния р-типа с концентрацией легирующей примеси (бора) $N_{\rm B}$ =1,5 10^{16} см⁻³. Слой SiO₂ толщиной 1000 Å создавался термическим окислением поверхности (100) кремния в сухом кислороде с добавкой хлорсодержащей компоненты. Алюминиевый электрод площадью 6,8 · 10-2 см2 наносился на поверхность окисла методом термического распыления в вакууме. Лавинная инжекция электронов из кремния в окисел осуществлялась в импульсном режиме (на алюминиевый электрод подавалась последовательность прямоугольных импульсов положительного напряжения). Количество инжектированных через границу раздела Si-SiO₂ электронов измерялось с помощью электрометрического усилителя В7-30. Информация о плотности поверхностных электронных состояний (ПС) кремния извлекалась из высокочастотных и квазистатических вольт-фарадных кривых, а также зависимостей поперечной высокочастотной проводимости от частоты [3]. Все измерения, кроме специально оговоренных в тексте, проводились при комнатной температуре.

Экспериментальные результаты и их обсуждение.

1. Зависимость тока лавинной инжекции от заряда ПС. В качестве параметра, характеризующего процесс лавинной инжекции электронов в импульсном режиме, введем «приведенный ток» лавинной инжекции [4]:

 $I^* = I_{\rm H3M} T / t_{\rm H}.$

Здесь $I_{изм}$ — измеряемая величина постоянной составляющей тока лавинной инжекции; T — период повторения импульсов напряжения; t_{u} — длительность импульсов, которая в наших экспериментах была постоянной и равной 5 мкс (увеличение t_{u} нецелесообразно из-за «самоторможения» лавинного пробоя в МДП-структурах [4]).

Если за время $T-t_{\rm N}$ система успевает релаксировать к исходному состоянию, величина приведенного тока I^* не зависит от периода повторения импульсов. Из-за того, что процессы релаксации к равновесию протекают в течение конечного времени, приведенный ток при $T \leq 200$ мкс оказывается зависящим от скважности импульсов (рис. 1).

На рис. 1, а показаны типичные зависимости 1* от протяженности интервала времени импульсами $T - t_{\mu}$ между для исходных МДП-структур (плотность ПС в средней части запрещенной зоны кремния исходных структур $N_{SS} \sim 10^{10}$ см⁻² · эВ⁻¹). Видно, что приведенный ток приблизительно экспоненциально спадает с ростом (Т--*t*_и). Этот спад обусловлен рекомбинацией неравновесных электронно-дырочных пар в кремнии, возникщих во время приложения импульсного напряжения [4]. После окончания импульса оставшиеся в объеме кремния избыточные электроны инициируют при подаче следующего импульса развитие лавины и инжекцию электронов из кремния в SiO₂.

Приведенные на рис. 1, *а* кривые спрямляются в полулогарифмических координатах (см. рис. 1, *б*), из наклона полученных прямых легко определить время жизни неосновных носителей заряда т. При постоянном положительном напряжении смещения на затворе * V_{g0} = =+2 В в приповерхностной области кремния реализуется сильная инверсия, поверхностная рекомбинация при этом в значительной степени подавлена и время жизни соответствует объемному: $\tau = \tau_0$ (в данном случае $\tau_0 \simeq 40$ мкс). При $V_{g0} = 0$ и -3 В $\tau \approx 35$ мкс $< \tau_0$ из-за вклада поверхностей рекомбинации; величину скорости поверхностной рекомбинации можно оценить по формуле

 $S = h (1/\tau - 1/\tau_0) \simeq 100 \text{ cm/c}$

(здесь h — толщина пластины кремния).

По мере увеличения числа электронов, пересекших границу раздела Si-SiO₂ (дозы лавинной инжекции D_e), вид зависимостей I^* от $T-t_{\rm H}$ начинает претерпевать все более заметные изменения (рис. 2). При положительных напряжениях смещения на затворе $V_{g0}>0.5$ B,

^{*} При изменении постоянного смещения V_{g0} амплитуда импульсного напряжения $V_{\mathbf{x}}$ регулировалась таким образом, чтобы максимальное напряжение на затворе $V_{\mathbf{x}}$ сохранялось неизменным ($V_{\mathbf{x}} = V_{g0} + V_{\mathbf{x}} = \text{const}$).

соответствующих образованию слоя сильной инверсии в кремнии, а также при достаточно больших отрицательных смещениях ($V_{g0} < < -3$ В), при которых в приповерхностной области кремния реализуется сильное обогащение дырками, характер кривых I^* ($T-t_n$) качественно сохраняется таким же, как и ранее. Однако с ростом D_e начинают все более существенно отличаться уровни стационарных величин приведенного тока I^*_{cr} , соответствующих большим величинам $T-t_n \ge 180$ мкс (для отрицательных смещений V_{g0} стационарный при-



Рис. 1



Рис. 1. Зависимость приведенного тока лавинной инжекции исходных МДП-структур от длительности интервала между импульсами напряжения на затворе, в обычных (а) и полулогарифмических (б) координатах. Напряжение смещения V_{g0}, В: 0 (1); —3 (2); +2 (3). Максимальное напряжение V_м=50,7 В

Рис. 2. Зависимость приведенного тока лавинной инжекции лавинно-деградированных МДП-структур от длительности интервала между импульсами. Доза лавинной деградации $D_e=5,5\cdot10^{16}$ эл·см⁻². Температура измерений 300 К. Напряжение смещения V_{g0} , В: 0 (1); -0,5 (2); -1 (3); -2 (4); -4 (5); +4 (6); максимальное напряжение $V_{m}=52,8$ В

веденный ток значительно больше, чем для Vg0>0). Очевидно, что это отличие в величинах I* ст может быть обусловлено только различным зарядом на ПС кремния в режимах сильного обогащения и сильной инверсии. Из рис. 2 видно, что в области смещений, соответствующих переходу от сильной инверсии к обогащению (-2B<Vg0<0), наблюдается качественно новый участок на зависимостях I* (T-t_и). Постоянная времени, отвечающая этому участку, уменьшается при снижении напряжения смещения Vgo (т. е. при возрастании концентрации дырок в области пространственного заряда). Отсюда можно заключить, что рост І* на рассматриваемом участке связан с захватом свободных дырок на ПС. Учитывая, что при напряжении плоских зон время захвата дырок тр~20 мкс (рис. 2, кривая 3), легко оценить сечение захвата дырок поверхностными состояниями: $C_n \simeq 10^{-19} \text{ cm}^2$. Столь малые величины С_р, по-видимому, указывают на значительную перестройку нейтральных центров захвата при локализации на них дырок (т. е. на сильное электрон-фононное взаимодействие) [5].

Таким образом, при подаче импульса положительного напряжения на затвор захваченные дырки стимулируют процесс инжекции электронов из кремния в окисел. Возможны два механизма такого стимулирования. Во-первых, за время $t_{\rm M}$ может происходить эмиссия дырок с ПС в валентную зону кремния. Попадая в область сильного приповерхностного поля, дырки могут приобретать энергию, достаточную для ударной ионизации и развития лавины. При этом количество электронов в приповерхностной области кремния будет возрастать. Во-вторых, накопление дырок на ПС приводит к росту напряженности электрического поля у поверхности кремния во время подачи импульса напряжения. Это также может быть причиной увеличения числа горячих электронов, способных преодолеть потенциальный барьер на границе Si-SiO₂.

Естественно ожидать, что при понижении температуры эмиссия дырок с ПС будет значительно ослабляться, поскольку туннельная эмиссия с глубоких ПС невозможна. Однако из эксперимента следует, что понижение температуры не только не подавляет эффекта стимулирования лавинной инжекции электронов, захваченными на ПС дырками, но может даже увеличивать его. Следовательно, основной причиной рассматриваемого эффекта является «полевое» действие захваченных дырок.

Приведем простые оценки. После накопления дозы лавинной инжекции $D_e = 5 \cdot 10^{16}$ эл см⁻² плотность ПС в средней части запрещенной зоны кремния достигает $\sim 3 \cdot 10^{11}$ эВ⁻¹ см⁻². Соответственно, заряд, накопленный на ПС в режимах сильного обогащения и сильной инверсии, должен отличаться на $\Delta Q_{SS} \simeq 2 \cdot 10^{11}$ элем. зар. см⁻². Локализация на ПС такого положительного заряда эквивалентна увеличению амплитуды импульса напряжения на затворе $V_{\rm M}$ примерно на 1 В. Поскольку полученные нами экспериментальные зависимости тока лавинной инжекции от амплитуды импульсов $V_{\rm M}$ могли быть аппроксимированы при $V_{\rm M} \ge 48$ В соотношением

 $I_{\text{изм}} = I_0 \exp(aV_{\text{M}}),$

где $a \simeq 2 B^{-1}$ — численный коэффициент, получаем, что стационарный ток лавинной инжекции при $V_{g0} \ll -3$ В должен превышать его величину при $V_{g0} \gg 1$ В в 7–8 раз. Как видно из рис. 2, это хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Снижение амплитуды импульсного напряжения сопровождается уменьшением количества горячих электронов, способных преодолеть потенциальный барьер на границе Si-SiO2, и соответственно падением тока лавинной инжекции. Захват положительноого заряда на ПС вызывает помимо рассмотренного выше интегрального полевого действия также локальное понижение потенциального барьера, отделяющего Si от SiO₂ (как это происходит при приближении к границе Si—SiO₂ ионов Na [6]). Это приводит к дополнительному увеличению тока лавинной инжекции при относительно малых полях, которое особенно существенно при низких температурах, когда снижается рассеяние инжектированных носителей на фононах в переходном слое Si-SiO₂ [7]. Очевидно, что в этих условиях (близкие к порогу лавинообразования импульсные электрические поля и низкие температуры) инжекция электронов в окисную пленку происходит весьма неоднородно по площади МДП-структуры. Однако чувствительность инжекционного тока к заряжению ПС в этом режиме максимальна.

2. Зависимость эффективности дефектообразования от режима лавинной инжекции. Из экспериментальных данных следует, что в процессе импульсной лавинной инжекции с отрицательным напряжением смещения на затворе ($V_{g0} \ll -2$ В) во время каждого периода происходит перезарядка ПС. За время t_n и развития лавины на глубокие ПС захватываются электроны, после окончания импульса — дырки. В режиме лавинной инжекции с $V_{g0} >$ $> (0 \div +1$ В) такой постоянной перезарядки ПС не происходит. Поэтому представлялось интересным исследовать генерацию ПС в процессе лавинной инжекции электронов из Si в SiO₂ в двух указанных режимах. Соответствующие экспериментальные данные представлёны на рис. 3. Видно, что рост плотности ПС с увеличением дозы D_e



Рис. 3. Генерация ПС в процессе импульсной инжекционной деградации при положительном $V_{g0} = +4$ В (светлые точки) и отрицательном $V_{g0} = -4$ В (темные точки) напряжении смещения. Доза лавинной деградации $D_0 = 3 \cdot 10^{15}$ (1); $1 \cdot 10^{16}$ (2) и 2,2 $\cdot 10^{16}$ эл. см⁻² (3). Здесь и на рис. 4 по оси абсцисс отложена энергия в запрещенной зоне в электронвольтах

Рис. 4. Энергетические спектры ПС МДП-структуры после инжекционной деградации (доза $D_e = 6 \cdot 10^{15}$ эл. см⁻²) — 1; после вакуумного отжига, $T = 50^{\circ}$ С, 1 ч — 2; после двух циклов отжига, $T = 100^{\circ}$ С, 1 ч + лавинная деградация ($D_e = 2 \cdot 10^{15}$ эл. см⁻²) — 3, после четырех циклов — 4

вблизи середины запрещенной зоны E_i в области максимума N_{SS} в обоих режимах инжекции приблизительно одинаков. Однако генерация ПС, энергетические уровни которых удалены от середины зоны, отличается в этих режимах кардинальным образом — лавинная инжекция электронов с отрицательным смещением на затворе сопровождается значительно более интенсивной генерацией «мелких» ПС. Отсюда следует однозначный вывод о том, что дефектообразование — один из существенных процессов, ответственных за диссипацию энергии, выделяющейся при захвате свободных носителей заряда на глубокие уровни границы раздела Si—SiO₂.

Эксперименты по отжигам инжекционно-деградированных структур свидетельствуют о том, что физическая природа дефектов, ответственных за пик N_{SS} вблизи середины запрещенной зоны, совершенно иная, нежели ПС, характеризующихся плавным энергетическим спектром (рис. 4). Пик плотности ПС полностью удаляется в результате низкотемпературных вакуумных (50°, 1 ч) прогревов (рис. 4, кривая 2). Для отжига же плавной компоненты спектра ПС необходимы прогревы при достаточно высоких температрах (250—300°С).

С целью лучшего понимания природы ПС было проделано несколько серий последовательных отжигов инжекционно-деградированных структур с последующим новым накоплением дозы D_e при постоянном напряжении смещения на затворе $V_{g0} = +4$ В. На рис. 4 показано распределение плотности ПС на границе Si-SiO₂ после нескольких последовательных циклов низкотемпературных отжигов (100° С, 1 ч) и лавинной инжекции электронов (доза $D_e = 2 \cdot 10^{15}$ эл. см⁻²). Видно, что после 4-го цикла отжиг — набор дозы темп генерации пика плотности ПС значительно снижается, хотя плотность ПС, характеризующихся плавным энергетическим спектром, возрастает с каждым последующим циклом.

По-видимому, для появления характерного пика N_{SS} в средней части запрещенной зоны кремния необходима инжекция горячих электронов из Si в SiO₂, которые затем инициируют генерацию активного агента, диффундирующего к границе Si—SiO₂. Взаимодействие этого активного агента с границей раздела и приводит к возникновению пика плотности ПС вблизи E_i [8]. При повторных циклах инжекционная деградация—вакуумный отжиг происходит постепенное уменьшение количества дефектов на границе Si—SiO₂, являющихся «затравочными» при образовании ПС, ответственных за пик плотности вблизи E_i (в частности, ослабленных связей Si—Si, Si—O). Плавная компонента энергетического спектра ПС не требует для своего возникновения инжекции носителей заряда из полупроводника в окисел — для этого достаточно протекания на границе раздела интенсивного процесса рекомбинации электронов и дырок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Hsu C. C. H., Pan S. C. S., Sah C. T.//J. Appl. Phys. 1985. **58**, N 5. P. 1236. [2] Меуег W. G., Fair R. B.//IEEE Trans. El. Dev. 1983. **30**, N 2. P. 96. [3] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М., 1984. T. I. [4] Козлов С. H., Потапов А. Ю. Препринт физ. фак. МГУ № 31/1986. М., 1986. [5] Schulz M., Johnson N. M.//Solid State Comm. 1978. **25**, N 7. P. 481. [6] DiSteiano T. H.// //Appl. Phys. Lett. 1968. **12**, N 6 P. 220. [7] Ning T. H.//Solid State Electron. 1978. **21**, N 1. P. 273. [8] Fischetti M. V., Gastaldi R., Maggioni F., Modelli A.//J. Appl. Phys. 1982. **53**, N 4. P. 3129.

Поступила в редакцию 21.03.88