

05.3;12;06

©1995

ДЕГРАДАЦИЯ МЕЖФАЗНОЙ ГРАНИЦЫ Si-SiO₂ ПРИ ПОЛЕВЫХ И РАДИАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

И.В.Климов, Ю.М.Листопадов, А.И.Назаров

Понимание причин, вызывающих деградацию металл-диэлектрик-полупроводник (МДП) транзисторов при воздействии "горячих носителей", имеет большое значение для создания методик прогнозирования долговременной и радиационной стабильности элементов интегральных схем, выбора технологических процессов производства и режимов работы полупроводниковых приборов [1].

В работе исследованы структуры поликристаллический кремний — двуокись кремния — кремний с тремя типами окислов (паровой, пироженный и сухой), выращенными на кремниевой подложке *n*-типа (концентрация легирующей примеси $N_d = 7 \cdot 10^{16} \text{ 1/cm}^3$). Для определения параметров МДП структур использовался метод высокочастотных и квазистатических вольт-фарадных характеристик (ВРХ).

Из результатов эксперимента следует, что для всех типов окисла радиационный и лавинно-инжектируемый заряд формируются аналогичным образом. Это подтверждает результаты работы [2], в которых установлено соотношение между величиной инжектированного дырочного заряда и поглощенной диэлектриком дозой

$$1.6 \cdot 10^{13} \text{ 1/cm}^2 \Leftrightarrow 10^6 \text{ Rad}$$

и предложена методика, предназначенная для проведения испытаний металл-окисел-полупроводник (МОП) структур на радиационную стойкость нерадиационными методами.

Исследование влияния напряженности электрического поля (длительности импульса лавинной инжекции (ЛИ)) на величину накапливаемого заряда показало, что при увеличении длительности лавины с 0.4 до 0.8 μs величина захваченного заряда уменьшается. Это возможно по двум причинам: во-первых, идет более активное растекание положительного объемного заряда с ловушек в электрическом поле или, во-вторых, оказывает свое влияние дополнительная электронная инжекция, приводящая к рекомбинации электронов с захваченным положительным зарядом. По-видимому, преобладает последний фактор, что следует из нарушения пропорциональной зависимости между величиной инжектируемого заряда и длительностью лавины, наблюдаемой для малых длительностей импульса $t < 0.5 \mu\text{s}$, а также из изменения формы сигнала на нагрузочном сопротивлении в схеме по ЛИ дырок (появляется дополнительный пик, соответствующий возникновению инжекции электронов из затвора). Возникновение этого пика происходит при напряженности электрического поля в двуокиси кремния, равной $E = 5 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$.

Из измерения величины полного тока и значения эффективности ЛИ дырок [2] нами была рассчитана доля электронного тока при длительности импульсов $t = 0.8 \mu\text{s}$. Электронная и дырочная компоненты оказались примерно равными друг другу.

На рис. 1 изображена зависимость плотности поверхностных состояний (ПС) от величины поверхностного потенциала для образца с "паровым" окислом при различных воздействиях на МОП структуру. Можно заметить, что туннельная электронная инжекция и лавинная дырочная инжекция с электронной компонентной ($t = 0.8 \mu\text{s}$), а также облучение при положительном напряжении на затворе вызывают существенный рост ПС на границе раздела кремний — двуокись кремния. После воздействия на исследуемый образец рентгеновских квантов без приложения напряжения на затвор или монополярной дырочной инжекции плотность ПС осталась на уровне исходной. Аналогичные результаты наблюдались и для других типов образцов.

По сравнению с кинетикой накопления объемного заряда рост ПС происходит быстрее т. е. межфазная граница оказалась более чувствительной к внешнему воздействию, чем объем диэлектрика. Наибольшая плотность ПС, так же как и объемный заряд, наблюдалась у образца с "сухим" окислом. Воздействие на структуру лавинной инжекции, при которой наряду с дырочной компонентой через диэлектрик

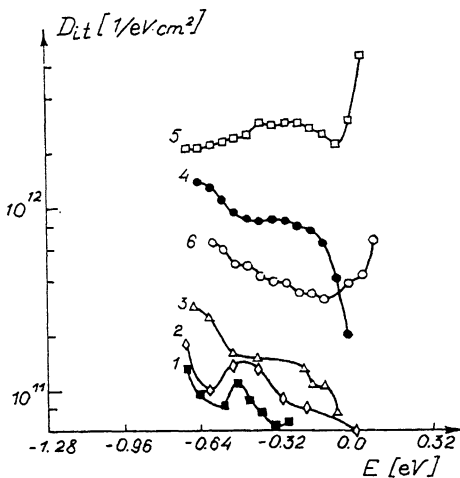


Рис. 1. Спектр плотности поверхностных состояний МОП структуры с паровым окислом после различных воздействий.

1 — исходный; 2 — после монополярной дырочной лавинной инжекции; 3 — после рентгеновского облучения при $V_G = 0$, $D = 2 \cdot 10^5$ Rad; 4 — рентгеновского облучения при $V_G = 5$ V, $D = 2 \cdot 10^5$ Rad; 5 — после туннельной инжекции электронов; 6 — после лавинной инжекции дырок при длительности лавины $t = 0.8$ μ s.

протекает электронный ток, приводило к увеличению плотности ПС (в отличие от объемного заряда). Согласно гипотезе Лая [3], это происходит за счет энергии, выделяющейся при рекомбинации электронно-дырочных пар у межфазной границы окисла. Следовательно, для роста ПС принципиальным моментом является наличие электрического поля, а также одновременное присутствие электронов и дырок в области межфазной границы. Наличие дырок при туннельной инжекции электронов объясняет, например, механизм, предложенный Фишетти [4].

В данной работе проводились также исследования деградации полевых МДП транзисторов после однородной лавинной инжекции электронов. Лавинная инжекция осуществлялась в условиях самостабилизированного пробоя путем подачи импульсов обедняющего напряжения треугольной формы на затвор относительно подложки.

В качестве образцов были выбраны n -канальные транзисторы, с толщиной подзатворного диэлектрика $d_{OX} = 50$ nm, изготовленного по влажной и сухой технологиям, и отношением ширины канала к длине $w/L = 100/8$. Измерялись подпороговые характеристики и ток зарядовой накачки.

Предварительно были сняты спектры ПС методами квазистатических вольт-фарадных характеристик и зарядовой

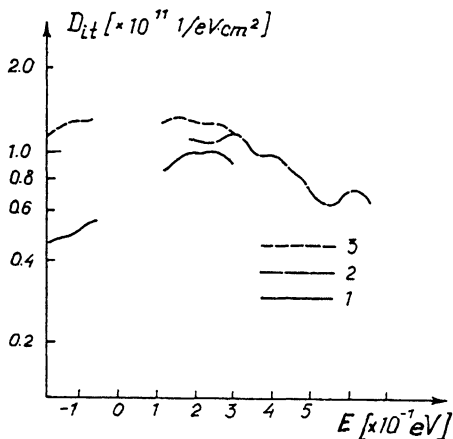


Рис. 2. Спектр плотности поверхностных состояний до и после лавинной инжекции электронов.

1 — исходный, определенный из квазистатических ВФХ; 2 — исходный, определенный методом зарядовой накачки; 3 — после лавинной инжекции электронов, $N = 10^8$.

накачки на конденсаторах и транзисторах, изготовленных на одном кристалле. Сравнение спектров в энергетическом диапазоне, перекрываемом обоими методиками, дает достаточно хорошее совпадение. Несколько завышенные значения плотности поверхностных состояний из ВФХ, по всей вероятности, объясняются меньшей чувствительностью этого метода в диапазоне от 10^{10} до $10^{11} \text{ 1/eV} \cdot \text{cm}^2$ [5].

В процессе лавинной инжекции электронов определялась величина плотности ПС методами зарядовой накачки и подпороговых характеристик. Сравнение полученных величин позволило сделать вывод о росте флуктуаций поверхностного потенциала. После критической величины протекшего заряда, соответствующей 10^8 импульсов, произошло выравнивание потенциального рельефа. Исследование кинетики накопления заряда в диэлектрике подтвердило результаты, полученные на конденсаторах. Наиболее стойкими оказались транзисторы с подзатворным диэлектриком, изготовленным по влажной технологии.

По измеренным спектрам ПС, представленным на рис. 2, с помощью метода зарядовой накачки обнаружен преимущественный рост плотности ПС в нижней части запрещенной зоны кремния. Величина критической напряженности поля в диэлектрике при лавинной инжекции, после которой происходит значительный рост плотности ПС, оказалась $E > 2 \cdot 10^6 \text{ V/cm}$.

Анализируя зависимости плотности ПС от величины поверхностного потенциала при радиационных и высокопотенциальных воздействиях для всех исследуемых элементов интегральных схем, видим, что качественно подтверждается гипотеза о существовании зависимости роста плотности ПС от технологии изготовления окисного слоя при наличии в диэлектрике электрического поля напряженностью $E > 2 \cdot 10^6$ В/см и присутствии в области межфазной границы носителей зарядов обоих знаков. Установлены режимы воздействия горячими носителями (рентгеновское облучение, лавинная дырочная и туннельная электронная инжекция), позволяющие прогнозировать деградационные изменения в МОП структурах.

Список литературы

- [1] *Nicollian E.N., Brews J.R.* MOS Physics and Technology. N.Y., Pergamon Press, 1982. P. 900.
- [2] *Назаров А.И., Гуртов В.А., Кузнецов С.Н., Сергеев М.С.* // Микроэлектроника. 1991. Т. 20. В. 3. С. 36–43.
- [3] *Lai S.K.* // Appl. Phys. Lett. 1981. V. 39. N 1. P. 58–60.
- [4] *Fischetti M.V., Di Maria D.J., Brorson S.D., Thies T.N., Kirtley J.R.* // Phys. Rev. B. 1985. V. 31. N 12. P. 8124–8142.
- [5] *Назаров А.И., Листопадов Ю.М.* Микроэлектроника. 1994. Т. 23. В. 4. С. 67–73.

Поступило в Редакцию
7 ноября 1994 г.
В окончательной редакции
16 февраля 1995 г.
