

вии ультразвука показало, что при частотах 10^5 Гц и амплитудах $\epsilon^0 < 4 \cdot 10^{-4}$ область вблизи пучности напряжений в процессе деформирования ультразвуком нагревается не более чем на 10 К по отношению к комнатной температуре.

Установлено, что разность температур между областями кристалла, прилегающими к пучностям и узлам напряжений, достигает 2—3 К в упругой области и 8—10 К при пластическом деформировании. Таким образом, повышение температуры не может существенно повлиять на изменение пластических свойств исследованных кристаллов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Швидковский Е. Г., Дургарян А. А. // Науч. докл. высш. школы. 1958. № 5. С. 211. [2] Белозерова Э. П., Тяпунина Н. А., Швидковский Е. Г. // Кристаллография. 1963. 8, № 2. С. 232. [3] Тяпунина Н. А. // Физика деформационного упрочнения монокристаллов. Киев, 1972. С. 228. [4] Тяпунина Н. А., Благовещенский В. В., Зиненкова Г. М., Ивашкин Ю. А. // Изв. вузов. Физика. 1982. № 6. С. 118. [5] Тяпунина Н. А., Наими Е. К. // Изв. АН ЛатвССР, сер. физ. и техн. наук. 1970. № 6. С. 30. [6] Казанцев В. В., Бадалян В. Т. // ФММ. 1983. 55, № 1. С. 191. [7] Тяпунина Н. А. Автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 1972. [8] Зиненкова Г. М., Тяпунина Н. А., Силис М. И. и др. // ДАН СССР. 1986. 286, № 2. С. 345. [9] Жуков А. Г., Горюнов А. Н., Кальфа А. А. Тепловизионные приборы и их применение. М., 1983. [10] Брамсон М. А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. М., 1965. [11] Загоруйко Н. В., Резников Б. А., Тяпунина Н. А., Хамидова Н. И. // ФТТ. 1966. 8, № 1. С. 166.

Поступила в редакцию
28.03.88

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1989. Т. 30, № 4

УДК 592.315

ВЛИЯНИЕ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ Si В SiO₂ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ МДП-СТРУКТУРЫ

Ю. Н. Касумов, С. Н. Козлов

(кафедра общей физики для химического факультета)

Исследована электрическая нестабильность кремниевых МДП-структур в зависимости от количества электронов, инжектированных из кремния в слой SiO₂. Инжекция электронов осуществлялась методом лавинного пробоя приповерхностной области кремния.

В процессе инжекции электронов из кремния в слой SiO₂ постепенно происходит инжекционная деградация структуры металл—диэлектрик—полупроводник (МДП-структуры), характерными признаками которой являются: 1) рост плотности быстрых электронных состояний на границе раздела Si—SiO₂; 2) накопление в окисной пленке сначала отрицательного, а затем положительного заряда (так называемый «эффект возврата»); 3) генерация медленных электронных состояний (МС), ответственных за долговременную электрическую нестабильность МДП-структур [1—3]. Пока не установлены достаточно точно условия возникновения МС, в частности зависимость темпа образования МС от количества инжектированных электронов, а также от температуры. Полностью отсутствует какая-либо информация о влиянии инжекции носителей заряда из кремния в окисел на электрическую нестабильность

МДП-структур, обусловленную миграцией в слое SiO_2 подвижных ионов. Выяснению этих моментов и посвящена настоящая работа.

Использовались МДП-структуры, изготовленные на базе кремния КДБ-1 с ориентацией поверхности (100). Слой SiO_2 толщиной 1000 Å создавался методом термического окисления кремния в сухом кислороде с добавлением небольшого количества (десятые доли процента) паров йода. Полевые электроды площадью $1,6 \text{ мм}^2$ изготавливались из молибдена. Инжекция электронов из кремния в окисную пленку осуществлялась методом импульсного лавинного пробоя приповерхностной области Si в режиме, обеспечивающем однородное протекание потока электронов по площади МДП-структуры [4]. С этой целью на металлический электрод подавались импульсы положительного напряжения длительностью 5 мкс, период повторения импульсов 10 мкс. Величина инжекционного тока через МДП-структуру поддерживалась постоянной: $8 \cdot 10^{-8}$ или $8 \cdot 10^{-7}$ А, для этого амплитуда импульса регулировалась в пределах 45—67 В. Ток лавинной инжекции из кремния в окисел измерялся с помощью приборов В7-30 или В7-21.

В качестве параметра, характеризующего количество возникающих в процессе инжекционной деградации МС, использовалась величина заряда ΔQ , накопленного на поверхности кремния при приложении к затвору напряжения $V_g = \pm 10$ В в течение 30 мин. Изменение заряда поверхности ΔQ определялось по сдвигу вольт-фарадных характеристик МДП-структуры по оси напряжений, при этом учитывалась только компонента поверхностного заряда, не стекающая за время ~ 20 с.

Типичные зависимости ΔQ от полного количества электронов, прошедших через единицу поверхности границы раздела Si— SiO_2^* , показаны на рис. 1. Сразу после проведения лавинной инжекции существенная часть возникших МС заполнена электронами, поэтому при небольших концентрациях МС ($D_e < 4 \cdot 10^{16}$ электрон·см $^{-2}$) приложение положительного напряжения к затвору не вызывает дополнительного накопления электронов на МС. Наоборот, в этих условиях в окисле вблизи границы Si— SiO_2 накапливается положительный заряд, величина которого постепенно возрастает с увеличением дозы инжекционной деградации. При возрастании D_e от $2 \cdot 10^{15}$ до $4 \cdot 10^{16}$ электрон·см $^{-2}$ (см. кривую 1 на рис. 1) положительный заряд, накапливаемый вблизи поверхности кремния при подаче положительного напряжения на затвор, почти на порядок увеличивается. Отсюда следует, что в процессе инжекции электронов из кремния в окисел существенно растет электрическая нестабильность МДП-системы, связанная с миграцией по окисному слою ионного заряда. Очевидно, этот эффект обусловлен генерацией подвижных ионов в окисной пленке: по-видимому, при диссипации энергии горячих электронов в SiO_2 происходит колебательное возбуждение структурной сетки окисла, в результате часть подвижных ионов высвобождается из ионных ловушек. Как следует из приведенных данных, при $D_e \approx (3-4) \cdot 10^{16}$ электрон·см $^{-2}$ величина ΔQ достигает максимума, затем в области более высоких доз D_e уменьшается и при $D_e \geq 5 \cdot 10^{16}$ электрон·см $^{-2}$ меняет знак. Это свидетельствует о том, что при $D_e > 5 \cdot 10^{16}$ электрон·см $^{-2}$ основную роль в электрической нестабильности инжекционно-деградированных МДП-структур играет перезарядка возникающих в процессе лавинной инжекции МС, тогда как при $D_e < 4 \cdot 10^{16}$ электрон·см $^{-2}$ — миграция подвижного ионного заряда.

* В дальнейшем эта величина будет называться дозой инжекционной деградации D_e .

При подаче отрицательного напряжения на затвор $V_g = -10$ В происходит разрядка части заполненных электронами МС, а также удаление положительных подвижных ионов от границы Si—SiO₂. Эти про-

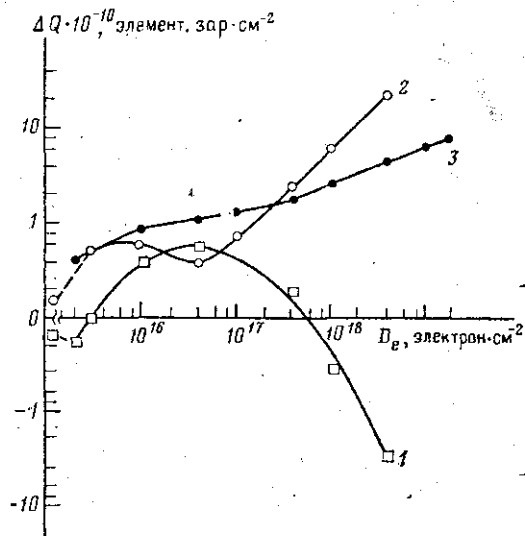


Рис. 1

Рис. 1. Изменение заряда границы раздела Si—SiO₂ при приложении положительного (1) и отрицательного (2, 3) напряжения к металлическому электроду в зависимости от дозы лавинной инжекции. Температура проведения лавинной инжекции и измерений 300 (1, 2) и 115 К (3)

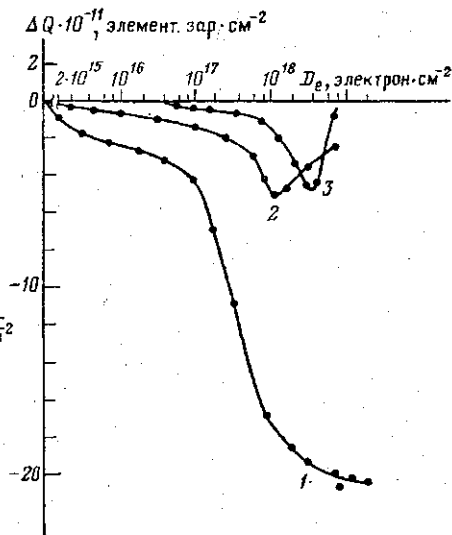


Рис. 3

Рис. 3. Зависимость заряда границы раздела Si—SiO₂ от дозы инжекционной деградации. Температура проведения лавинной инжекции и измерений 115 (1), 295 (2) и 393 К (3)

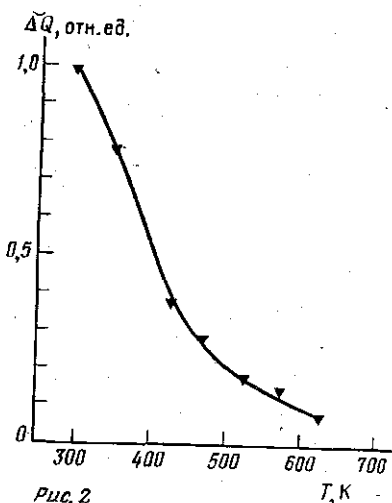


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость величины заряда, накопленного на МС при приложении напряжения к МДП-структуре, от температуры предварительного вакуумного отжига структуры. Время отжига 1 ч, исходная доза инжекционной деградации $D_e = 10^{19}$ электрон·см⁻², температура инжекционной деградации и измерений 300 К

цессы при небольших дозах лавинной инжекции $D_e \leq 4 \cdot 10^{16}$ электрон \times см⁻² в значительной степени компенсируют друг друга (нет увеличения ΔQ с ростом D_e) — см. кривую 2 на рис. 1, хотя знак ΔQ определяется перезарядкой МС. Как видно из кривых 2 и 3, генерация МС заметна уже при достаточно малых дозах $D_e \sim 2 \cdot 10^{15}$ электрон·см⁻². Увеличение дозы лавинной инжекции ($D_e > 4 \cdot 10^{16}$ электрон·см⁻²) сопровождается постепенным возрастанием ΔQ , а следовательно, плотности МС, приблизительно пропорционально логарифму величины дозы. Та-

кой характер зависимости ΔQ (D_e) свидетельствует о наличии достаточно широкого диапазона величин сечений дефектообразования, характеризующих процесс стимулированной инжекцией электронов генерации МС [5].

Отжиги инжекционно-деградированных МДП-структур в вакууме показали, что полное исчезновение дефектов, ответственных за МС, происходит при температурах выше 620 К (рис. 2). Это не подтверждает предположения авторов работы [6] о том, что при температурах выше 370 К «эффект возврата» отсутствует из-за отжига МС в процессе лавинной инжекции. Поэтому вызывает сомнение корректность предложенной в работе [7] методики определения величины заряда, накопленного на МС, которая целиком основана на сопоставлении кинетики заряжения поверхности кремния при разных температурах. Как легко видеть из данных, приведенных на рис. 3, «эффект возврата» регистрируется при температуре 393 К, однако заметное накопление вблизи границы Si—SiO₂ положительного заряда происходит при больших дозах, чем это наблюдается при 300 К. Этот сдвиг точки экстремума ΔQ по оси D_e обусловлен частичным, но далеко не полным отжигом МС при 393 К (см. рис. 2).

При низких температурах (100—150 К) генерация МС при лавинной инжекции электронов происходит приблизительно с такой же эффективностью, как при комнатной температуре (величины ΔQ при 300 К практически не зависят от того, при какой температуре осуществлялась предварительная инжекционная деградация). Однако, так как процесс перезарядки МС — активационный, за одно и то же время приложения электрического поля к МДП-структуре (30 мин) при 115 К заряд МС изменяется на меньшую величину, чем при 300 К (ср. кривые 2 и 3 на рис. 1 в области $D_e \geq 5 \cdot 10^{16}$ электрон·см⁻², где при $T \leq 300$ К вклад ионного дрейфа в величину ΔQ мал). При $T = 115$ К практически не проявляются эффекты, связанные с ионно-дрейфовой нестабильностью, из-за сравнительно большой энергии активации миграции ионов (зависимость ΔQ от D_e имеет постоянный наклон, нет каких-либо особенностей — см. кривую 3 на рис. 1).

Поскольку в процессе лавинной инжекции при 100—150 К большое количество инжектированных в SiO₂ электронов захватывается на мелкие локализованные состояния окисла, накопление положительного заряда на МС («эффект возврата») при низких температурах наблюдать не удается (см. кривую 1 на рис. 3).

Выводы.

1. В процессе лавинной инжекции электронов из кремния в слой SiO₂ возрастает количество подвижных ионов в окисле.

2. Генерация МС при лавинной инжекции происходит с заметной скоростью уже при малых дозах ($D_e \sim 10^{15} - 5 \cdot 10^{15}$ электрон·см⁻²). С увеличением дозы концентрации МС возрастает приблизительно пропорционально логарифму величины дозы.

3. Полный отжиг дефектов, составляющих основу МС, происходит при температуре 600—620 К. Закономерности «эффекта возврата», характеризующего электрическую нестабильность МДП-структур, определяются двумя процессами: частичным отжигом МС при повышенных температурах и замедлением перезарядки МС при пониженных.

В заключение авторы благодарят В. Л. Залесского и Н. А. Колобова за предоставление образцов для исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Chen A. J., Dadgar S., Hsu C. C. et al.//J. Appl. Phys. 1986. 60, N 4. P. 1391. [2] Young D. R., Irene E. A., Di Maria D. J. et al.//J. Appl. Phys. 1979. 50, N 10. P. 6366. [3] Fischetti M. V.//J. Appl. Phys. 1984. 56, N 2. P. 575. [4] Козлов С. Н., Потапов А. Ю. Препринт физ. фак. МГУ № 31/1986. М., 1986. [5] Kozlov S. N.//Phys. Stat. Sol. (a). 1977. 42. P. 115. [6] Fischetti M. V., Gastaldi R., Maggioni F., Modelli A.//J. Appl. Phys. 1982. 53, N 4. P. 3129. [7] Fischetti M. V., Gastaldi R., Maggioni F., Modelli A.//J. Appl. Phys. 1982. 53, N 4. P. 3136.

Поступила в редакцию
01.04.88