

слоя небольшое и при облучении изменяется мало. Облучение границы раздела металл — легированный As_2S_3 вызывает переход ионов из металла, ионы диффундируют через легированный слой к нелегированному полупроводнику. Облучение границы $As_2S_3Ag_{2,4} - As_2S_3$ вызывает переход серебра из легированного слоя в нелегированный As_2S_3 , убыль серебра вблизи этого перехода компенсируется диффузионным переносом от металлического слоя через легированный As_2S_3 . Процесс фотолегирования в зависимости от параметров слоев и условий экспонирования можно реализовать, облучая как обе, так и одну из вышеуказанных границ. Этим и объясняется неоднозначность результатов выполненных ранее исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goldschmidt D., Bernstein T., Rudman P. S. The kinetics of photodissolution of silver in amorphous As_2S_3 films // Phys. Stat. Sol. (a).— 1977.— 41, N 1.— P. 283.
2. Lakshmi Kumar S. T. A new model for photodiffusion of silver in amorphous chalcogenides // J. Non-Cryst. Sol.— 1986.— 88, N 2—3.— P. 196.
3. Matsuda A., Kikuchi M. Observations of photovoltage in Ag photodoping of amorphous As_2S_3 films // Solid State Commun.— 1973.— 13, N 3.— P. 401.
4. Kluge G. A new interpretation of the photodoping effect in amorphous As — and Ge-chalcogenides // Phys. Stat. Sol. (a).— 1987.— 101, N 1.— P. 105.
5. Костышин М. Т., Романенко П. Ф., Красноженов Е. П. О применимости правила Урбаха для описания светочувствительности и поглощения света полупроводниковыми слоями с примесями и дефектами // ФТП.— 1968.— 2, № 8.
6. Janai M. Photodissolution of silver in amorphous As_2S_3 films // Phys. Rev. Lett.— 1981.— 47, N 10.— P. 726.
7. Lis S. A., Lavine J. M. Ag photodoping of amorphous chalcogenides // Appl. Phys. Lett.— 1983.— 42, N 8.— P. 675.
8. Yokota J. On the theory of mixed conduction with special reference to the conduction in silver sulphide group semiconductors // J. Phys. Soc. of Jap.— 1961.— 16, N 11.— P. 2213.
9. Костышин М. Т., Касярум О. П., Кудрявцев А. А. Моделирование процесса фотолегирования в системе полупроводник — металл на основе представлений о ее трехслойной структуре // Укр. физ. журн.— 1987.— 32, № 7.
10. Owen A. E., Firth A. P. and Ewen P. J. S. Photo-induced structural and physico-chemical changes in amorphous chalcogenide semiconductors // Phil. Mag. B.— 1985.— 52, N 3.— P. 347.

Поступила в редакцию 30 июня 1989 г.

УДК 621.383.8 : 621.3.049.774.2

С. А. МАЛЫШЕВ, Н. А. СВЯТКИНА, Ю. А. СМАНЦЕР,
В. С. ШЕВЦОВ
(Минск)

ОБРАЗОВАНИЕ МЕЖЭЛЕМЕНТНОГО ИНВЕРСИОННОГО СЛОЯ В ЛАВИННЫХ МДП-ФОТОПРИЕМНИКАХ

Использование МДП-структур, работающих в режиме лавинного умножения, для регистрации импульсного излучения обладает рядом достоинств: внутренним усилением до 10^4 , слабой зависимостью амплитуды выходного сигнала от питающего напряжения, возможностью реализации режима счета фотонов [1, 2]. Все это делает их перспективными для применения в системах обработки оптической информации. В то же время при лавинном умножении происходит инжекция горячих носителей в диэлектрик, что является одной из причин деградации МДП-струк-

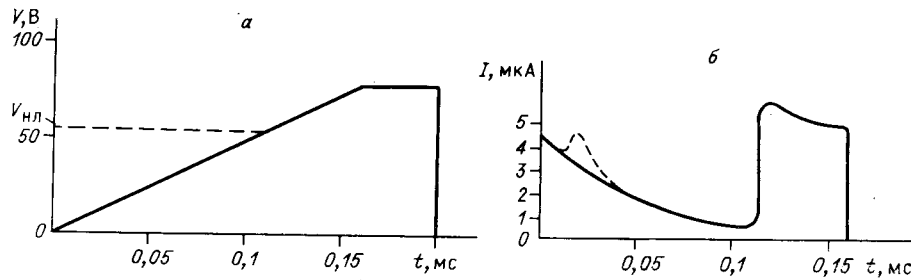


Рис. 1. Трапецеидальный импульс напряжения питания (а) и соответствующая ему временная диаграмма тока смещения МДП-структуры (б)

тур, приводит к образованию в диэлектрике заряда и росту плотности быстрых поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик — полупроводник [3].

Следует отметить, что при лавинной инжекции горячих электронов в диэлектрик МДП-структуры встраивается отрицательный заряд [4]. Однако рядом авторов наблюдалось образование в диэлектрике и положительного заряда. Это происходило не только при лавинной инжекции электронов, но и при облучении МДП-структур электронными пучками, что связывается с образованием ловушек в результате деструкции межатомных связей вблизи границы раздела диэлектрик — полупроводник [3, 5, 6].

При лавинной инжекции неосновных носителей заряда в диэлектрик на характеристики МДП-структуры оказывает влияние краевой пробой [7]. Краевые эффекты другого рода в МДП-структуре сказываются в появлении электрической связи между инверсионными слоями под полевым электродом и окружающей его периферийной областью, что имеет место при значительном встроенном заряде соответствующего знака в диэлектрике вне полевого электрода [8].

В этой связи цель данной работы — изучение влияния краевого пробоя и образования в диэлектрике положительного заряда на электрофизические и фотоэлектрические характеристики расположенных рядом лавинных МДП-фотоприемников.

Исследуемые структуры изготовлены на основе кремния *p*-типа с концентрацией мелких акцепторов $1,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Диэлектрик толщиной 0,12 мкм получен термическим окислением подложек в сухом кислороде при температуре 1200 °С. Полевые электроды из алюминия или никеля формируются в виде круга либо в виде кольца, помещенного внутри кольца. МДП-структуры с соответствующей конфигурацией электродов именуется в дальнейшем «круг» или «кольцо». Для осуществления режима лавинного умножения на полевой электрод подается импульсное трапецеидальное напряжение [1] с крутизной фронта $5 \cdot 10^5 \text{ В/с}$ (рис. 1, а). Временная диаграмма тока смещения представлена на рис. 1, б. Доза инжектированного заряда находится в пределах 0,04—2,0 Кл/см². Исследуются вольт-фарадные релаксационные *C* — *t*-характеристики, сдвиг напряжения лавинообразования, а также изменения амплитуды фотосигнала в зависимости от величины инжектированного заряда.

Для проверки наличия краевого пробоя в рассматриваемых структурах проводится эксперимент, суть которого сводится к предварительной наработке в лавинном режиме МДП-структуры, полевой электрод которой выполнен в виде круга ($\varnothing 330 \text{ мкм}$). Затем с помощью процесса фотолитографии из «круга» ($\varnothing 330 \text{ мкм}$) формируется структура «круг» ($\varnothing 195 \text{ мкм}$) — «кольцо» ($\varnothing 330$ и 230 мкм). Проведенные исследования *C* — *V*-характеристик отдельно полученных «круга» и «кольца» позволяют оценить вклад инжекции горячих носителей в центральную и периферийную части МДП-структуры.

Как видно из рис. 2, инжекция горячих носителей в диэлектрик МДП-структур (доза 0,04 Кл/см²) приводит к искажению вида *C* — *V*-

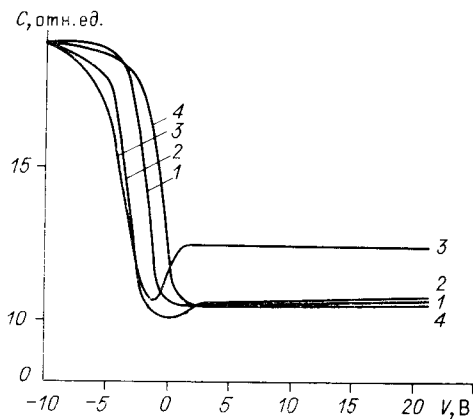


Рис. 2. $C - V$ -характеристики: 1, 2 — круглого электрода до и после инъекции электронов ($\sim 0,04$ Кл/см²); 3, 4 — соответственно «кольца» и «круга» после их формирования из круглого электрода (с инжектированным предварительно зарядом $\sim 0,04$ Кл/см²)

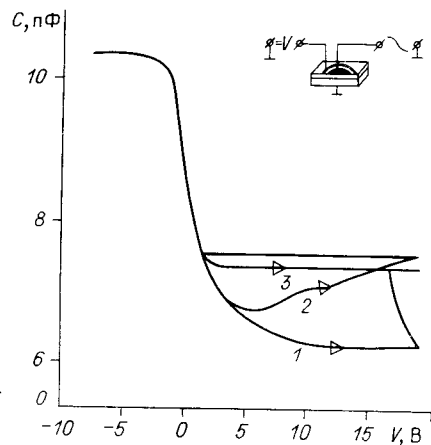


Рис. 3. $C - V$ -характеристики «круга» в зависимости от напряжения на «кольце» для дозы инжектированного в «кольцо» заряда $0,1$ Кл/см²:

1 — неравновесная (прямой ход), $\alpha' = 0,1$ В/с; $V_K = -10$ В; 2 — неравновесная (прямой ход), $\alpha' = 0,1$ В/с; $V_K = +10$ В; 3 — равновесная, $\alpha' = 0,01$ В/с; $V_K = 0$ В

характеристики периферийной части электрода (кривая 3), тогда как $C - V$ -характеристика центральной части электрода остается практически без изменения (кривая 4).

Вольт-фарадная характеристика исходной МДП-структуры («круг») определяется при этом суперпозицией $C - V$ -характеристик краевой и центральной частей полевого электрода и не дает правильного физического представления о механизме деградации МДП-структуры при лавинной инъекции горячих носителей в диэлектрик. При дозе инжектированного заряда более $1,0$ Кл/см² $C - V$ -характеристика центральной части электрода также начинает искажаться, что указывает на перемещение области лавинного пробоя к центру электрода.

Влияние краевых эффектов на электрофизические и фотоэлектрические свойства соседних лавинных МДП-фотоприемников исследуется на структурах «круг»—«кольцо». В исходный диэлектрик МДП-структуры («кольцо») инжектируется различная доза заряда и затем изучаются $C - V$ -характеристики «круга» при постоянном напряжении смещения на «кольце».

При дозе инжектированного заряда $0,1$ Кл/см² наблюдается зависимость прямого хода неравновесной $C - V$ -кривой «круга» от напряжения на «кольце» (рис. 3). Положительное смещение на «кольце» приводит к изменению неравновесной характеристики «круга», что свидетельствует о росте темнового тока. На временной диаграмме тока смещения «кольца» при этом появляется пик (см. рис. 1, б, штриховая линия), амплитуда которого уменьшается при возрастании частоты импульсов питания. Кроме того, амплитуда и положение пика в значительной степени зависят от величины постоянного смещения на «круге». Напряжение лавинообразования $V_{пл}$ (см. рис. 1, а) на «кольце» возрастает на величину от единиц до десятков вольт при подаче постоянного положительного смещения на «круг» либо с уменьшением частоты повторения импульсов питания.

Таким образом, налицо возникновение межэлементной электрической связи в результате лавинной инъекции в диэлектрик одного из элементов. Следует отметить, что при долговременном (до 10^7 циклов) воздействии на «круг» трапециoidalного напряжения питания меньше на несколько вольт, чем напряжение начала лавинообразования, заметной электрической связи между структурами «круг»—«кольцо» не наблюдается.

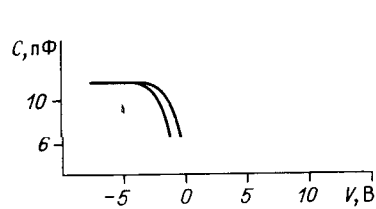


Рис. 4. $C - V$ -характеристики «круга» до лавинной инжекции в «кольцо», $f = 1$ МГц (кривая 1) и для дозы инжектированного в «кольцо» заряда 1 Кл/см^2 в зависимости от частоты измерительного сигнала: 2 - $f = 100 \text{ кГц}$; 3 - $f = 1$; 4 - 3,3; 5 - 10 МГц

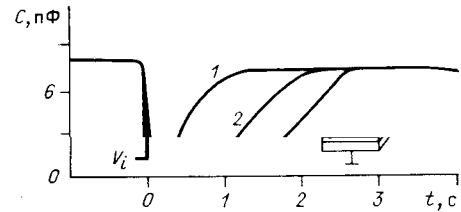


Рис. 5. $C - t$ -характеристики «круга» при постоянном положительном смещении и импульсе напряжения на «кольце» (В):

- 1 - $V_{\text{кр}} = +20$; $V_{\text{к}}: V_i = -10$; $V_f = +20$;
 2 - $V_{\text{кр}} = +5$; $V_{\text{к}}: V_i = -10$; $V_f = +40$;
 3 - $V_{\text{кр}} = +20$; $V_{\text{к}}: V_i = -10$; $V_f = +40$

Появление пика на временной диаграмме тока смещения «кольца» сопровождается появлением подобного пика и при подаче импульса питания на «круг», хотя последний не подвергается лавинной инжекции. Рассматривая вольт-фарадные характеристики, напряжение лавинообразования, положение и величину пика тока смещения, можно отметить полную симметрию влияния режима работы одной МДП-структуры на другую.

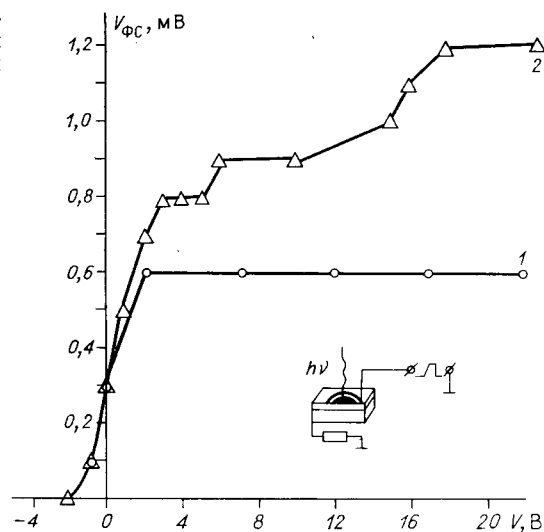
При дозе инжектированного заряда (в «кольцо») порядка 1 Кл/см^2 величина пика на временной диаграмме тока смещения «кольца» возрастает. $C - V$ -характеристика «круга» сдвигается в сторону отрицательных напряжений до нескольких вольт и искажается, хотя в данной структуре инжекция не проводилась. При этом появляется сильная частотная дисперсия вольт-фарадных характеристик «круга» (рис. 4). Дальнейший рост дозы инжектированного заряда сопровождается образованием в диэлектрике отрицательного заряда и ослаблением межэлементной электрической связи между исследуемыми МДП-структурами.

Рассматриваемые зависимости могут быть объяснены встраиванием в ходе инжекции горячих электронов в диэлектрик положительного заряда и его последующим диффузионно-полевым дрейфом из-под затвора МДП-структуры в межэлектродные области.

Распространение положительного заряда уверенно наблюдается по сдвигу $C - V$ -характеристик соседних МДП-структур, удаленных на несколько десятков микрометров. Под межэлектродным диэлектриком при этом образуется инверсионный слой, соединяющий области пространственного заряда (ОПЗ) соседних МДП-структур. Следует отметить, что излом прямого хода неравновесной $C - V$ -характеристики при подаче положительного смещения на соседний электрод является первым признаком возникновения межэлементной электрической связи. Такой излом $C - V$ -кривой обнаруживается на МДП-структурах с межэлектродным зазором, равным 50 мкм . Для отдельных образцов этот эффект проявляется при зазоре 400 мкм .

Излом прямого хода неравновесной $C - V$ -характеристики (см. рис. 3, кривая 2) и появление пика на диаграмме тока смещения (см. рис. 1, б, штриховая линия) указывают на существование порогового потенциала, при достижении которого происходит перенос носителей заряда из-под «кольца» в ОПЗ «круга», что приводит к перекачке дополнительного заряда под «кольцо», вызывает сдвиг напряжения начала лавинообразования, величина которого сильно зависит от частоты импуль-

Рис. 6. Зависимость напряжения фототоклика, работающего в лавинном режиме «кольца» при импульсном освещении «круга», от величины постоянного смещения на «круге»: 1 — для исходной структуры; 2 — после прохождения дозы инжектированного заряда в $0,16 \text{ Кл/см}^2$



сов на «кольце» и постоянного смещения на «круге», определяющих величину поступающего дополнительного заряда.

Наглядно процесс переноса заряда можно продемонстрировать, исследуя реакцию емкости «круга», находящегося под постоянным положительным смещением, на прямоугольный обедняющий импульс, поданный на «кольцо» (рис. 5). В первоначальный момент времени, благодаря более высокому поверхностному потенциалу, в ОПЗ «кольца» переносится заряд из инверсионного слоя «круга», затем инверсионный слой «кольца» заполняется вплоть до выравнивания поверхностных потенциалов МДП-структур (см. рис. 5, кривая 2, участок *a*). Далее происходит самосогласованная релаксация емкости «круга» и «кольца» и обычная релаксация емкости «круга».

Рассмотрим влияние поверхностного проводящего канала на фотоэлектрические характеристики лавинных МДП-структур. На рис. 6 представлена зависимость величины фотосигнала, снимаемого с нагрузки работающего в лавинном режиме «кольца» при импульсном освещении «круга» ($\lambda = 0,85 \text{ мкм}$, $t_n = 0,2 \text{ мкс}$), от величины подаваемого на «круг» постоянного смещения. В исходном состоянии при отсутствии инжектированного в «круг» заряда фотоэлектрическая связь обусловлена диффузионной составляющей (см. рис. 6, кривая 1). При инжекции заряда в МДП-структуру ($\sim 0,1 \text{ Кл/см}^2$) на нагрузке «кольца» появляется фотосигнал, обусловленный фотоэлектрической связью между двумя элементами. Его амплитуда увеличивается с увеличением дозы инжектированного в «круг» заряда и при его определенной величине достигает насыщения.

Таким образом, встраивающийся в МДП-структуру при инжекции горячих электронов положительный заряд дрейфует на расстояние в несколько десятков микрометров от края электрода, и под межэлектродным диэлектриком образуется инверсионный слой. Наличие такого слоя ведет к изменению режима работы МДП-структуры за счет сдвига напряжения начала лавинообразования, вносит свой вклад в электрическую и фотоэлектрическую связи между элементами, что может заметно повлиять на фотоэлектрические характеристики многоэлементных лавинных МДП-фотоприемников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольбрайх Н. И., Шубин В. Э., Плотников А. Ф., Кравченко А. Б. Исследование лавинного процесса в МДП-структуре // Микроэлектроника.— 1979.— 8, № 11.
2. Ветохин С. С., Гулаков И. Р., Залесский В. Б., Шуневич С. А. Исследование лавинных МДП-фотоприемников в режиме счета фотонов // ДАН БССР.— 1987.— 31, № 2.
3. Sah C. T., Sun J., Tzou J. Generation-annealing kinetics of the interface donor states at 0.25 eV above the midgap and the turn-around phenomena on oxidized silicon during avalanche electron injection // J. Appl. Phys.— 1983.— 54, № 5.— P. 2547.
4. Fischetti M. V., Gastaldi R., Maggioni F., Modelli A. Slow and fast states induced by hot electrons at Si—SiO₂ interface // J. Appl. Phys.— 1982.— 53, N 4.— P. 3136.

5. **Sah C. T., Sun J., Tzou J.** Generation-annealing kinetics and atomic models of a compensating donor in the surface space charge silicon // J. Appl. Phys.—1983.—53, N 2.—P. 944.
6. **Fischetti M. V.** The importance of the anode field in the controlling the generation rate of the donor states at the Si—SiO₂ interface // J. Appl. Phys.—1984.—56, N 2.—P. 575.
7. **Залесский В. Л., Козлов С. Н., Невзоров А. Н., Потапов А. Ю.** Влияние деградации при лавинном пробое на генерационную активность кремниевых МДП-структур // Электрон. техника. Сер. Полупроводниковые приборы.—1988.—Вып. 1(192).
8. **Nicollian E. H., Goetzberger A.** Lateral AC current flow model for metal-insulator-semiconductor capacitors // IEEE Trans. Electron Dev.—1965.—ED-12.—P. 108.

Поступила в редакцию 2 января 1989 г.
