

УДК 621.539.216; 621.375.826

А. Р. Новоселов, А. Г. Клименко

(Новосибирск)

**СКРАЙБИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВОГО
КРИСТАЛЛА ИЗЛУЧЕНИЕМ ИМПУЛЬСНОГО
УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ЛАЗЕРА
НА МИКРОННЫХ РАССТОЯНИЯХ ОТ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Экспериментально определено минимальное расстояние (5 мкм), на котором скрайбирование в плазменно-сратерном режиме ультрафиолетовым наносекундным лазером еще не приводит к изменению свойств МДП-устройств на кремниевой пластине. Проведено скрайбирование Si-мультиплексоров, предназначенных для гибридных ФПУ, на расстоянии 28 мкм от активных элементов.

При изготовлении гибридных матричных фотоприемных устройств, состоящих из кристалла-матрицы фотоприемников, соединенной методом Flip-Chip на индиевых микростолбах с кремниевыми устройствами выборки-считывания (мультиплексор), возникает проблема стыковки мультиплексоров из кристаллов меньшего формата, чем матрица фотоприемников, так как необходимо приблизить край кристалла к активным элементам мультиплексора на расстояние в несколько микрон. Традиционные способы ограничения (алмазным скрайбером или дисковой пилой) здесь не удается применить в связи с большой зоной повреждения поверхности Si (более 80 мкм). Импульсное ультрафиолетовое лазерное воздействие дает менее протяженную зону повреждения Si.

Определению минимального расстояния, при котором лазерное скрайбирование кристаллов Si, содержащих МДП-устройства, не сказывается на электрических параметрах этих устройств, посвящено данное сообщение.

Из литературы известно, что лазерное воздействие вызывает деградацию окисла при дозах облучения более 10^{14} см⁻² и образование медленных поверхностных состояний при дозах ультрафиолетового излучения менее 10^{14} см⁻² на границе Si-SiO₂ [1]. При выборе объекта исследования было отдано предпочтение структуре, состоящей из двух МДП-транзисторов, образующих стробируемый интегратор, который используется во всех устройствах, выполняющих функцию накопления-считывания информации. Принцип работы стробируемого интегратора [2] показан на рис. 1.

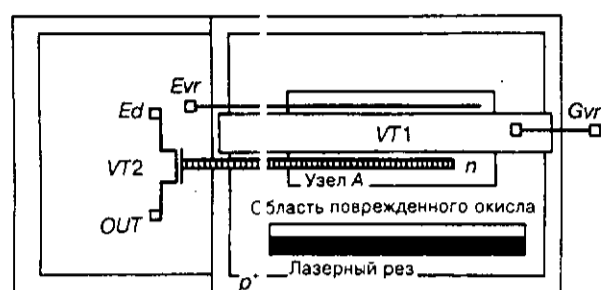


Рис. 1. Строблируемый интегратор:

$VT2$ – транзистор считывания; OUT – информационный выход; Ed – вывод, на который подается напряжение питания $VT2$; VT – транзистор сброса; Gvr – затвор транзистора сброса; Evr – вывод, на который подается напряжение питания $VT1$

1. Узел A заряжается до смещения, поданного на сток транзистора сброса Evr , при импульсе разрешающего напряжения на затворе Gvr транзистора сброса.

2. После прекращения действия импульса Gvr узел A остается под плавающим потенциалом.

Узел A представляет собой истоковую область транзистора сброса, которую можно рассматривать как конденсатор с параллельными пластинами. Такими пластинами является пара полупроводниковых (проводящих) областей, разделенных диэлектриком (обедненным слоем, образующимся при обратном смещении $p-n$ -перехода) [3]. Со временем в узле A происходит термогенерация носителей (темной ток), которая приводит к понижению потенциала узла A . Кроме тепловой генерации носителей на границе раздела, обусловленной поверхностями генерационными центрами, существует тепловая генерация через ловушки с уровнем энергии внутри запрещенной зоны и диффузионный ток на краях обедненной области [2].

Тестовая структура выполнена на $p-Si\{100\}$ по МДП-технологии со стоп-диффузией, концентрация в подложке 10^{15} см^{-3} , область под затвором легирована As с концентрацией $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, области стока и истока транзисторов легированы As с концентрацией 10^{20} см^{-3} (см. рис. 1).

На рис. 2 представлено графическое исполнение осциллограмм, снятых осциллографом С8-13. Штриховая кривая демонстрирует разряд узла A с подсветкой при внешнем нагрузочном сопротивлении, равном 10 кОм, подключенном к выходу OUT , транзистор $VT2$ работает в режиме истокового повторителя. Результаты лазерного скрайбирования вблизи узла A представлены на рис. 3.

Кривая A аналогична штриховой кривой, представленной на рис. 2. Кривая B – разряд узла A через 30 мин после лазерного скрайбирования, которое проводилось на расстоянии 10,4 и 7,2 мкм от лазерного реза до видимого окна в толстом окисле, где происходит легирование $p-n$ -переходов. Причем зона видимых повреждений окисла заканчивалась на расстоянии 4,4 и 2,8 мкм от окна в толстом окисле соответственно. Кривая C демонстрирует разряд узла A , когда лазерный рез находился на расстоянии 5,6 мкм от окна, а

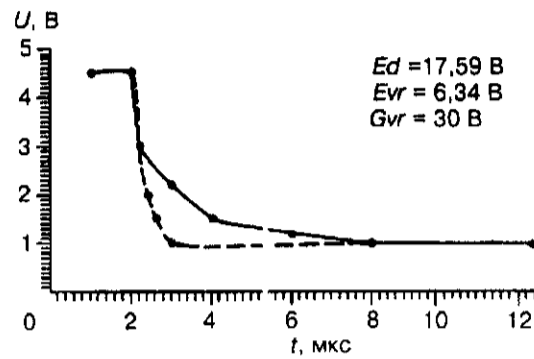


Рис. 2. Графическое исполнение осциллограмм разряда узла *A* по окончании импульса напряжения на затворе транзистора *VT1*.
Сплошная линия – темновой разряд, штриховая – разряд узла *A* с подсветкой

зона видимых повреждений окисла заканчивалась на расстоянии 1,4 мкм от окна.

Реальный *p-n*-переход больше сена в толстом окисле на 1,5 мкм, что вызвано диффузией легирующей примеси при отжиге. Следовательно, реально лазерный рез, описываемый кривой *B*, находился на расстоянии 8,9 и 5,7 мкм, а для кривой *C* – соответственно 4,1 мкм. На рис. 1 также показано пространственное положение лазерного реза относительно узла *A*. Через сутки проводились повторные измерения, показавшие, что ток разряда для расстояний 8,9 и 5,7 мкм стал аналогичен току разряда до лазерного воздействия. Такое поведение тока разряда емкости узла *A* может быть объяснено возникновением поверхностных состояний на границе Si/SiO_2 под действием ультрафиолетового облучения, которые с течением времени

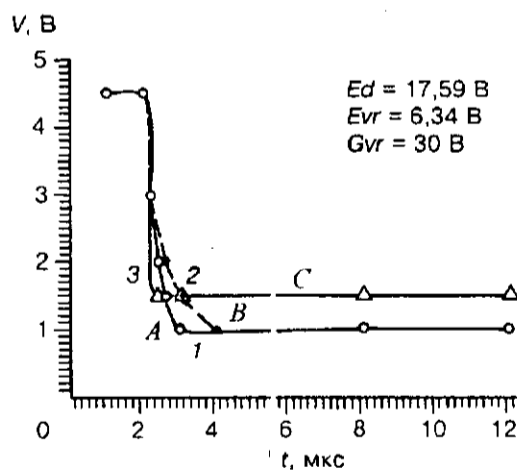


Рис. 3. Осциллограммы разряда узла *A* с подсветкой, полученные при лазерном скрайбировании на разных расстояниях до окна в толстом окисле:
A – исходная кривая; *B* – 10,4 и 7,2 мкм; *C* – 5,6 мкм

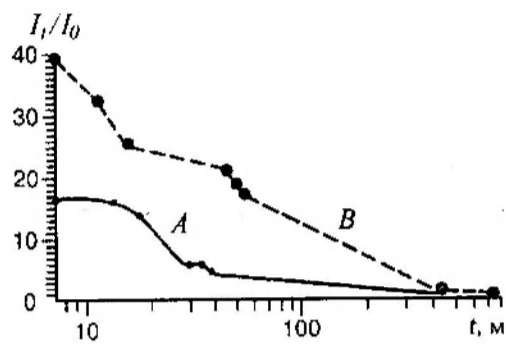


Рис. 4. Изменение обратного тока диода после лазерного скрайбирования на расстояниях 78 и 36 мкм от окна в толстом окисле до лазерного реза во времени:
 I_t/I_0 — отношение величины тока, протекающего в момент времени t , к исходному значению
 $I_0 = 4$ пА; $A : L = 78$ мкм; $B : L = 36$ мкм

релаксируют [4, 5]. Кривая разряда C (см. рис. 3) осталась без изменения. Для данного случая реальное расстояние между лазерным резом и p - n -переходом составило 4,1 мкм и зона поврежденного окисла затронула область узла A . Следовательно, можно сделать предположение о возникновении пробоя p - n -перехода.

Для проверки предположения о релаксации возникающих поверхностных состояниях на границе Si/SiO_2 под действием лазерного облучения был проведен эксперимент на отдельном диоде, имеющем размеры $47,4 \times 47,4$ мкм, изготовленном по p -канальной МОП-технологии на n - $\text{Si}\{100\}$ (концентрация 10^{15} см^{-3} , энергия легирования 50 кэВ). На диод подавалось 8,2 В через нагрузочное сопротивление 10^{10} Ом, на котором измерялось падение напряжения. Путем пересчета измерялся ток, протекающий через обратносмещенный p - n -переход. Результат эксперимента по релаксации воздействия лазерного излучения во времени представлен на рис. 4.

Для более точного измерения момента возникновения необратимого воздействия лазерного облучения было проведено измерение обратных токов p - n -перехода в зависимости от расстояния между стенкой лазерного реза и окном [6] для двух стандартных МОП-технологий: с охранными кольцами и LOCOS-технологии. На рис. 5 показаны результаты данного эксперимента.

Продукты распыления Si , способствующие увеличению тока, удалялись. В обоих случаях резкое возрастание токов возникало на расстояниях около 5 мкм, при напряжении, приложенном к p - n -переходу через нагрузочное сопротивление, аналогично эксперименту, описанному выше, 8,2 В.

Полученные данные в разных экспериментах (см. рис. 3 и 5) совпадают. Следовательно, можно предположить, что необратимые изменения в характеристиках МОП-приборов возникают при лазерном скрайбировании на расстояниях 5 мкм и менее от окна в толстом окисле.

В работе [6] рассчитывалось расстояние, на котором не должно сказываться воздействие мощного лазерного излучения на физические свойства p - n -перехода:

$$L = A + W(u) + g \times b + B, \quad (1)$$

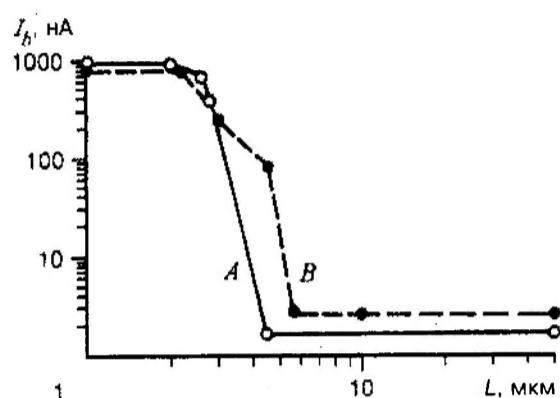


Рис. 5. Экспериментальные кривые возрастания токов обратносмещенного p - n -перехода от расстояния между лазерным резом до окна в толстом окисле. Диоды изготовлены по разным технологиям: A – LOCOS-технология, B – МОП-технология

где L – расстояние, на котором не сказывается влияние лазерного воздействия на электрические свойства p - n -перехода; A – расстояние от окна в толстом окисле до реальной границы p - n -перехода; $W(u)$ – ширина обедненной области p - n -перехода при напряжении питания U ; $g \times b$ – эффективная толщина слоя тепловых повреждений; g – «коэффициент запаса», равный 2–3; b – расстояние под импульсно-нагретой поверхностью, на котором температура материала в любой момент времени в e раз ниже, чем во время импульса на его поверхности, и определяется как $b = (x \times t)^{0,5}$ (x – коэффициент температуропроводности кремния; t – продолжительность импульса); B – расстояние, разделяющее внешнюю границу p - n -перехода и внутреннюю границу области тепловых повреждений.

При $t = 7$ нс, $b = 0,822$ мкм, $A = 0,5$ – $1,5$ мкм для рабочих напряжений 5–10 В $W(u)$ составляет 2–3 мкм при уровне легирования $N = 10^{15}$ см⁻³ [7].

Таким образом, ожидаемое минимальное расстояние, на котором еще нет влияния лазерного воздействия, при микроограниении составляет 4–5 мкм. Отметим, что соотношение (1) не учитывает воздействия лазерного излучения на слой окисла, окружающий p - n -переход.

В экспериментах применялся газовый импульсный лазер на молекулах азота, длина волны излучения составляла 0,34 мкм, продолжительность импульса – 7 нс, частота следования – 50–100 имп./с. Использовались два основных режима облучения:

а) режим сильно сфокусированного луча с шириной лазерного реза 2 мкм, глубина лазерного реза 6 мкм (для экспериментов, описываемых рис. 2, 3 и 5), мощность в импульсе на поверхности мишени 21 Вт (после диафрагмирования);

б) режим «большой мощности» с диаметром кратеров 9 мкм, глубина лазерных кратеров 60 мкм, мощность в импульсе на поверхности кремния ~0,5 кВт (для опытов, представленных на рис. 4).

На основе полученных результатов изготовлен и обследован работающий мультиплексор форматом 64×64, собранный из четырех кристаллов форматом 32×32. Использовались мультиплексоры 32×32 (шаг 100 мкм, с произвольной выборкой), предназначенные для соединения с фотоприем-

ными матрицами с помощью In-микростолбов [8]. Мультиплексоры изготовлены на подложке *n*-Si с «карманом» *p*-типа по МДП-технологии. Микроограниение проводилось на расстоянии 46 мкм от центра In-микростолбов краевых строк и столбцов. Это соответствует расстоянию примерно 28 мкм от видимого края «кармана». Ограничение мультиплексоров 32 × 32 осуществлялось в режиме облучения, описанном в п. 6.

Решение уравнения (1) при следующих численных данных: $A = 6 \pm 2$ мкм, $u = 5$ В, $W(u) = 2$ мкм [7], $t = 7$ нс, $b = 0,822$ мкм, $g = 3$, $B = 1,5$ мкм – дает минимальное расстояние, равное 14 мкм. В данном случае B представляет собой неровность края р-ва.

В наших экспериментах реализовано приближение лазерной стенки на расстояние 5 мкм к тестовым *p-n*-переходам и 28 мкм к схеме мультиплексора. Все кристаллы изготовлены по LOCOS-технологии.

Авторы благодарят А. И. Козлова за разработку, Б. И. Фомина за изготовление и И. В. Марчишина за облучение мультиплексоров, Н. Э. Бокка за предоставление тестовых структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Druif K. G., De Nijs J. M. M., Van der Drift E. et al. Slow states in vacuum ultraviolet irradiated metal-oxide-silicon systems // J. Appl. Phys. 1996. 79(3). P. 1505.
2. Приборы с зарядовой связью / Под ред. М. Хоува. М.: Энергоиздат, 1981. С. 21, 94.
3. Интегральные схемы на МДП-приборах / Под ред. В. М. Пенни. М.: Мир, 1975. С. 61.
4. De Nijs J. M. M., Van der Drift E. et al. Hydrogen induced donor-type Si/SiO₂ interface states // Appl. Phys. Lett. 1994. 65(19). P. 2428.
5. Afanas'ev V. V., De Nijs J. M. M. et al. Degradation of the thermal oxide of the Si/SiO₂/Al system due to vacuum ultraviolet radiation // J. Appl. Phys. 1995. 78(11). P. 6481.
6. Новоселов А. Р., Войнов В. Г., Недсекина Т. Н., Клименко А. Г. Теоретические ограничения и результаты приближения лазерной стенки на микронные расстояния к *p-n*-переходам в кремнии // Тр. Третий всерос. науч.-техн. конф. Таганрог: Таганрог. гос. ун-т, 1996.
7. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984.
8. Vasilyev V. V., Klimentko A. G., Kozlov A. I. et al. Focal plane arrays based on HgCdTe epitaxial layers MBE-grown on GaAs substrates // Proc. SPIE. 1997. 3061. P. 956.

Поступила в редакцию 14 января 1998 г.