

УДК 621.378.9 : 621.315.592 : 621.375.826 : 621.539.216

А. Р. Новоселов, А. Г. Клименко, Д. Г. Есаев, В. В. Васильев
(Новосибирск)

МЕТОД ЛАЗЕРНОГО СКРАЙБИРОВАНИЯ УЗКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПОДЛОЖЕК CdHgTe

Экспериментально изучено воздействие ультрафиолетового наносекундного лазерного излучения большой мощности на изменение электрофизических свойств *p-n*-переходов в узкозонной полупроводниковой подложке CdHgTe, находящихся вблизи области взаимодействия лазерного излучения с полупроводником, по методике измерений, отработанной на Si. Определено, что лазерное излучение вызывает изменения в исследуемом материале, причем расстояние между краем лазерного реза и краем диода, при котором не происходит необратимых изменений, зависит как от прикладываемого рабочего напряжения, так и от материала полупроводника и его исходных электрофизических свойств. Определены безопасные расстояния для лазерного скрайбирования: по CdHgTe это 20 мкм при рабочем напряжении 40 мВ, в то время как для Si это расстояние составляет 5 мкм при напряжении питания 8 В и 30 мкм – при 20 В. Полученные нами результаты по применению лазерного излучения для скрайбирования узкозонных фотоприемных матриц на CdHgTe вблизи фотодиодов позволяют решать задачу создания длинных многомодульных линейчатых и большеформатных матричных фотоприемных устройств.

При изготовлении гибридных фотоприемных устройств (ФПУ), состоящих из матриц фотоприемников, изготовленных на основе твердых растворов кадмий–ртуть–теллур (КРТ), и устройств выборки–считывания (мультиплексор) возникает проблема приближения края кристалла к области, где находятся активные элементы ФПУ, на расстояния в несколько микрометров без потери информации на стыках кристаллов. Определению минимального расстояния, при котором скрайбирование лазером поверхности кристаллов не сказывается на электрических параметрах фотоприемной матрицы на КРТ, посвящена данная работа.

В литературе довольно подробно описывается воздействие лазерного и вакуумного ультрафиолетового излучения на диоды и МДП-конденсаторы на кремнии [1–3]. В этих работах описан процесс облучения непосредственно исследуемого прибора и проводились измерения вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик в зависимости от мощности излучения, которая увеличивалась вплоть до начала разрушения прибора. В [4, 5] проводились исследования изменения структуры и свойств CdHgTe в зависимости от мощности излучения в зоне взаимодействия лазерного излучения с узкозонным материалом. На основе экспериментальных данных делается вывод о том, что лазерное излучение вызывает деградацию окисла

[2, 3] или верхнего слоя кремния глубиной 0,5 мкм [1]. Авторы работы [1] довольно подробно исследовали изменение свойств обратносмещенного диода под действием излучения лазера на Nd : YAG при мощностях излучения, вызывающих переплавление кремния ($P = 0,8$ мВт, продолжительность импульса 60 нс, диаметр пятна 10 мкм, частота следования импульсов 1000 Гц, что соответствует плотности энергии в импульсе 1 Дж/см^2). Согласно их данным, лазерное воздействие на диод начинает сказываться при мощностях излучения, которое действует через область $p-n$ -перехода. Следовательно, лазерное скрайбирование возможно осуществлять непосредственно по границе $p-n$ -перехода, так как при скрайбировании наносекундными импульсами происходит испарение вещества практически без нагрева соседних участков, и, следовательно, зона пораженной лазерным излучением подложки должна быть незначительна. В наших работах [6, 7] произведен расчет зоны теплового поражения кремния, который составил 0,822 мкм. Решение тепловой задачи, к сожалению, не позволяет решить проблему определения минимально возможного расстояния до элементов ФПУ при лазерном скрайбировании, так как не учитывает протяженность области, изменившей свои электронные свойства вокруг лазерного реза. Наши предварительные исследования показали, что область увеличения токов утечек возникает на расстояниях значительно больших, чем область $p-n$ -перехода [6, 7]. В данной работе мы описываем метод и практические результаты по определению протяженности области с изменившимися свойствами КРТ вблизи лазерного реза. В связи с тем, что узкозонные полупроводниковые материалы имеют довольно сложный состав, высокую скорость генерации носителей и диффузии их в объем, большую чувствительность к внешним механическим воздействиям (это может приводить к искажению получаемых результатов), часть экспериментов по определению методики и выяснению наиболее чувствительных параметров к лазерному излучению была проведена на Si.

Во всех нижеописанных экспериментах использовался импульсный ультрафиолетовый лазер на N_2 с длиной волны 0,34 мкм, длительностью импульса 7 нс, частотой повторения 100 Гц.

На рис. 1 представлены ВАХ обратносмещенных диодов на Si в зависимости от расстояния до края лазерного реза. Для эксперимента использовались диоды, выполненные путем легирования подложки p -типа (концентрация 10^{15} см^{-3}) мышьяком (концентрация $1,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), размером

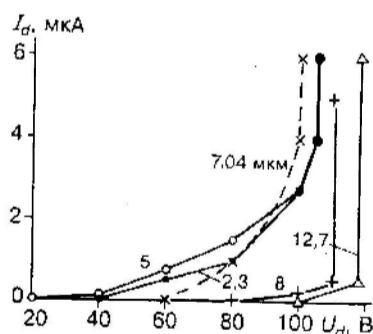


Рис. 1. ВАХ обратносмещенных диодов на Si при различных расстояниях до лазерного реза: цифры у кривых – расстояния

40 × 40 мкм. Измерения проводились характериографом ПНХТ-1 в режиме: развертка по X – 20 В/дел., по Y – 2 мкА/дел., $R_{\text{н}} = 85 \text{ кОм}$. Режим лазерного скрайбирования: импульсная мощность в пятне на поверхности кремния 2 кВт, диаметр пятна 13 мкм, что соответствует плотности энергии 10 Дж/см², глубина скрайбирования 60 мкм. Измерения проводились после удаления продуктов сгорания кремния с поверхности, что составляло не более 60 мин после начала скрайбирования. Полученные кривые показывают, что по мере приближения лазерного реза к границе диода (отсчет велся от видимого края диода) напряжение, при котором начинается область лавинного умножения носителей, приближается к области рабочих напряжений, используемых для питания мультиплексоров, при неизменном напряжении пробоя. Таким образом, наиболее чувствительным параметром к лазерному излучению следует считать ток, протекающий через обратносмещенный диод (обратный ток). В нашей работе [6] показано, что ток обратносмещенного диода после лазерного скрайбирования постепенно падает до исходного значения, поэтому измерения электрических параметров следует проводить через время более чем 500 мин.

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости обратного тока диодов, выполненных на Si, от расстояния до лазерного реза. Причем для снятия вопроса о воздействии лазерного излучения на границу раздела кремний – окисел, в котором образуются центры генерации–рекомбинации [1] с глубиной залегания до 0,5 мкм от поверхности кремния, и устранения возможности возрастания токов диода по поверхности пластины мы последовательно приближали луч лазера к диоду с тыльной стороны и по торцу кристалла. Полученные данные представлены на рисунке штриховой линией для напряжений на диоде 10 и 20 В. Измерения проводились вольтметром-электронметром В7-30 с пределом измерения 10 нА. Треугольники соответствуют напряжению на диоде 20 В, крестики – 10 В. Штриховые кривые стро-

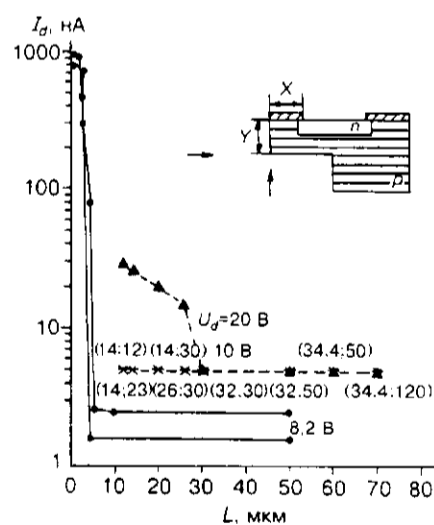


Рис. 2. Зависимость тока обратносмещенного диода на Si от расстояния до границы лазерного реза, вставка иллюстрирует описываемый эксперимент: стрелки показывают направление лазерного излучения; X и Y поясняют отсчет расстояний, указанных цифрами у кривых; U_{d1} – напряжение питания обратносмещенного диода

ились по данным, полученным через 12 ч после лазерного скрайбирования. Сплошные линии – экспериментальные кривые, снятые для диодов с лазерным резом по поверхности кремния путем пересчета падения напряжения на нагрузочном сопротивлении 10^{10} Ом через 12 ч после лазерного скрайбирования [6]. Исследования показали, что возрастание обратных токов диода не связано с поверхностными центрами генерации–рекомбинации, расположенными вблизи границы кремний – окисел.

В [8] приводятся данные по исследованию лазерного воздействия (рубиновый лазер, длина волны 0,694 мкм, длительность импульса 20 нс) на фотопроводимость и шумы в монокристаллах КРТ. Из полученных данных авторы делают вывод, что наиболее чувствительным параметром является фоточувствительность (снижение фоточувствительности наблюдается при плотности энергии излучения более $0,05$ Дж/см²). Основным источником изменений фоточувствительности является генерация лазерным излучением дефектов.

Наши эксперименты, аналогичные проведенным на кремниевой структуре, с постепенным приближением границы лазерного реза к границе фотоприемного диода проведены на пленках КРТ. Использовались гетероэпитаксиальные структуры $\text{Hg}_x\text{Cd}_{1-x}\text{Te}$, выращенные на подложках GaAs(130) с буферным слоем CdTe [9]. Пленки имели переменный состав по глубине с повышенным содержанием CdTe к границе с буфером и к внешней границе ($x_{\text{CdTe}} = 0,35$). Наличие широкозонного слоя приводит к подавлению поверхностных токов утечек в n - p -переходах. В объеме состав КРТ p -типа составлял $x_{\text{CdTe}} = 0,225$, что соответствовало длинноволновой границе фоточувствительности при $T = 78$ К около 10 мкм. Концентрация дырок $5,5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, подвижность 650 см²/В · с. Фоточувствительные n - p -переходы площадью 25×25 мкм формировались имплантацией ионов бора с энергией 135 кэВ. Поверхностная концентрация электронов в n -слое $9 \cdot 10^{13}$ см⁻² при $T = 77$ К и глубине около 1 мкм. Толщина p -слоя 8 мкм. В качестве омического контакта к n -области использовался индий, напыление которого проводилось методом термического испарения. Граница раздела КРТ – диэлектрик формировалась путем нанесения низкотемпературного диоксида кремния толщиной 70 нм методом CVD при пониженном давлении в процессе окисления моносилана кислородом в потоке аргона при $T = 100$ °С без дополнительной активации [10]. Последующая пассивация границы раздела производилась с помощью нанесения плазмохимического нитрида кремния толщиной 50 нм в процессе химической реакции моносилана с аммиаком в плазме тлеющего разряда при $T = 50$ °С.

Плотность энергии в пятне на поверхности КРТ со стороны p - n -перехода $1,5$ Дж/см², диаметр пятна 6 мкм, глубина скрайбирования 25 мкм, скорость движения образца относительно неподвижного луча лазера 2 мкм/с. Измерение темновых вольт-амперных характеристик и фоточувствительности к тепловому излучению АЧТ при 300 К проводилось не ранее чем через сутки после скрайбирования. Было обнаружено, что изменения ВАХ практически всегда носят пороговый характер по мере приближения линии лазерного реза к области n - p -перехода.

На рис. 3 показаны ВАХ диодов при удалении линии реза более чем на 20 мкм (кривая 1) и менее чем на 13 мкм (кривая 3). Кривая 2 соответствует удалению 18 мкм, хотя исходная ВАХ до скрайбирования практически

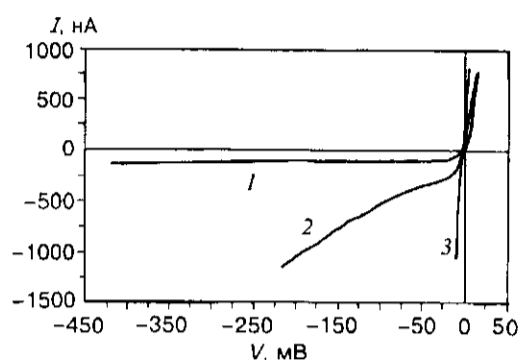


Рис. 3. ВАХ КРТ-диодов после лазерного скрайбирования на расстояниях: кривая 1 – исходная, лазерный рез проходит на расстоянии 20 мкм и более от края диода; кривая 2 – один из вариантов неполного пробоя в области расстояний от 13 до 20 мкм; кривая 3 – поведение ВАХ при полном пробое диода на расстояниях ближе 13 мкм

совпадала с кривой 1. Следует отметить, что из 20 диодов промежуточной области от 13 до 20 мкм лишь один показал характеристику типа кривой 2. Все остальные имеют либо исходный вид типа кривой 1, либо вид типа омической кривой 3.

На рис. 4 показаны значения обратных токов диодов до и после лазерного скрайбирования при напряжении смещения 40 мВ в зависимости от расстояния до линии лазерного реза. Видно, что при удалении линии реза более 20 мкм все диоды показывают практически неизменное поведение после скрайбирования (кривая типа 1 на рис. 3), при удалении менее 13 мкм – деградацию темновых ВАХ (кривая типа 3). Было обнаружено также, что до момента деградации *n-p*-перехода изменений фоточувствительности диодов не происходит. Отметим, что на рис. 4 часть диодов сохранила свои электрические параметры без изменения при расстояниях до лазерного реза менее 20 мкм, т. е. в области расстояний от 13 до 20 мкм находится переходная область, в которой сказывается исходное качество КРТ, где под понятием качества мы подразумеваем неоднородность материала по площади. Безопасное расстояние, полученное для узкозонного полупроводника CdHgTe, в 20 мкм соответствует современной технологической потребности, изложен-

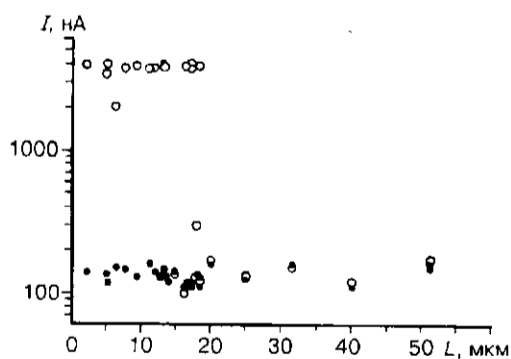


Рис. 4. Зависимость изменения обратного тока *p-n*-перехода на КРТ от расстояния до линии лазерного реза: исходные обратные токи *p-n*-переходов до (●) и после (○) лазерного скрайбирования

ной в работе [11], описывающей принцип изготовления длинных много-модульных линейчатых фотоприемных решеток.

Исследования показали, что воздействие лазерного излучения на материал мишени вызывает лавинное умножение носителей при напряжениях, превышающих рабочее, причем величина регистрируемого обратного тока зависит от расстояния между краем диода и лазерным резом.

Воздействие лазерного скрайбирования на материал носит объемный характер и не зависит от границы раздела полупроводник – окисел, а зависит только от исходного качества материала (см. рис. 2).

Лазерное излучение вызывает изменения в исследуемом материале, причем расстояние между краем лазерного реза и краем диода, при котором не происходит необратимых изменений, зависит как от прикладываемого рабочего напряжения, так и от материала полупроводника и его исходного качества.

Определены безопасные расстояния для лазерного скрайбирования: по CdHgTe – 20 мкм при рабочем напряжении 40 мВ, в то время как для Si оно составляет 5 мкм при напряжении питания 8 В и 30 мкм – при 20 В.

Полученные нами результаты по безопасному расстоянию в КРТ, равному 20 мкм, позволяют решать задачу создания длинных многомодульных линейчатых решеток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Parker D. L., Zhu S.-J., Zhang D.-K. et al. Selective lifetime doping in silicon by laser scanning // IEEE Trans. Electron Dev. 1982. ED-29, N 11. P. 1718.
2. Afanas'ev V. V., de Nijs J. M. M., Balk P. Degradation of the thermal oxide of the Si/SiO₂/Al system due to vacuum ultraviolet irradiation // J. Appl. Phys. 1995. 78, N 11. P. 6481.
3. Drujff K. G., de Nijs J. M. M., Van der Drift E. Slow states in vacuum ultraviolet irradiated metal-oxide-silicon systems // J. Appl. Phys. 1996. 79, N 3. P. 1505.
4. Afonso C. N., Alonso M., Neira J. L. H. et al. Pulsed laser induced effects on the HgCdTe surface // J. Vac. Sci. Technol. A. 1989. 7, N 6. P. 3256.
5. Jevtic M. M., Šćepanović M. J. Melting and solidification in laser – irradiated HgCdTe // Appl. Phys. 1991. A53. P. 332.
6. Новоселов А. Р., Клименко А. Г. Скрайбирование поверхности кремниевого кристалла излучением импульсного ультрафиолетового лазера на микронных расстояниях от активных элементов // Автометрия. 1998. № 4. С. 113.
7. Новоселов А. Р., Клименко А. Г. Теоретические ограничения и результаты приближения лазерной стенки на микронные расстояния к *p-n*-переходам в Si // Тр. Третьей Всерос. науч.-техн. конф. Дивноморское, 1996. С. 28.
8. Власенко А. И., Гнатюк В. А., Копишинская Е. П. и др. Влияние лазерного облучения на фотопроводимость и шумы в монокристаллах *n-Cd_xHg_{1-x}Te* // ФТП. 1997. 31, № 7. С. 820.
9. Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Liberman V. I. et al. Molecular beam epitaxy of high quality Hg_{1-x}Cd_xTe films with control of the composition distribution // J. Cryst. Growth. 1996. 159. P. 1161.
10. Васильев В. В., Дроздов В. Н., Салеева Г. Ю. Свойства слоев SiO₂, полученных окислением моносилана кислородом при 100 °С // Хим. физика. 1992. 11, № 12. С. 1683.
11. Chamonal J. P., Audebert P., Destefanis G. et al. Long MWIR HgCdTe butter linear arrays // Proc. SPIE. 1997. 3061. P. 467.

Поступила в редакцию 26 мая 1998 г.