

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

УДК 621.378.9 : 621.315.592 : 621.375.826 : 621.539.216

А. Р. Новоселов, А. Г. Клименко, М. А. Торлин

(Новосибирск)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ПОРАЖЕНИЯ  
В CdHgTe И Si ВБЛИЗИ ЛАЗЕРНЫХ КРАТЕРОВ  
ПРИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ОБЛУЧЕНИИ  
НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ**

С помощью сканирующего электронного микроскопа исследованы характерные зоны и их протяженность, возникающие при мощном импульсном ультрафиолетовом лазерном воздействии на полупроводниковые материалы, покрытые окислом Si и CdHgTe, в зависимости от количества импульсов облучения. Определен режим минимальной плотности энергии ( $1,1 \text{ Дж/см}^2$ ), при котором возникновение кратеров зависит от периода повторения импульсов и их количества. Данный режим работы лазера вызывает минимально возможные изменения материала мишени, что позволяет проводить неповреждающие лазерные работы вблизи электронных элементов микросхем на Si и CdHgTe. В наших исследованиях использовался лазер на  $\text{N}_2$  с длиной волны  $0,34 \text{ мкм}$  в импульсном режиме с длительностью импульса  $7 \text{ нс}$ .

Для работ, связанных с изготовлением сквозных отверстий или ограничением кристаллов вблизи диодов и транзисторов, возникает необходимость в прецизионном вызывающем минимальную зону поражения материала микроинструменте. Примером, показывающим необходимость такого рода инструментов, можно назвать изготовление гибридных матричных фотоприемных устройств (ФПУ) с кадмий-ртуть-теллур (КРТ)-матрицей фотоприемников и кремниевыми устройствами считывания-обработки информации без потери ее на стыкуемых гранях.

Данным требованиям удовлетворяет сильнофокусированный луч лазера. Лазерная микрообработка, особенно сверление отверстий и разрезание материала, предполагает удаление материала. Удаление происходит через процесс абляции [1], при котором материал мишени поглощает энергию лазерного излучения и превращается в жидкий расплав и пар. Расплав выгоняется из области взаимодействия (зона лазерного фокуса) силами отдачи, а пар удаляется самостоятельно.

Материал в фокальной плоскости нагревается до температур плавления и в зависимости от интенсивности и длительности импульса впоследствии до температуры испарения. Полупроводники характеризуются большой концентрацией свободных электронов и валентных электронов с потенциалом ионизации меньше чем энергия фотонов. Для относительно длительных

импульсов доминирует линейное поглощение и материал нагревается путем джоулева нагрева. Когда достигается температура плавления либо температура испарения, материал считают пробитым и поврежденным. Скорость нагрева определяется скоростью поглощения лазерной энергии и скоростью ухода энергии из зоны фокуса в основном по механизму теплопроводности. Энергия вносится в поверхностный слой, где толщина, в которой происходит поглощение, определяется зависимостью

$$l_s = 1/\alpha, \quad (1)$$

$\alpha$  – коэффициент поглощения.

Расстояние, на которое происходит распространение тепла из-за теплопроводности,

$$l_d = \sqrt{D\tau_1}, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент температуропроводности;  $\tau_1$  – длина лазерного импульса.

На рис. 1 из работы [2] представлена зависимость коэффициента поглощения от длины волны для кремния и соединения кадмий–теллур. Указаны длины волн используемых в настоящее время лазеров.

На рис. 2 из работы [1] показаны расчетные кривые глубины областей плавления и парообразования кремния в зависимости от мощности излучения лазера с длительностью импульса  $\tau_1 = 7$  нс для ближнего инфракрасного диапазона длин волн.

При выборе типа лазера для микроработ необходимо учитывать ряд требований:

- поглощение энергии непосредственно в области воздействия лазерного излучения;
- фокусировка луча лазера в пятно, имеющее микронные размеры;
- работа лазера в импульсном режиме.

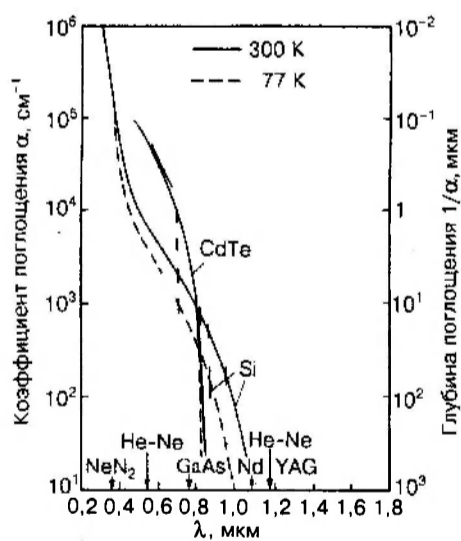


Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения от длины волны излучения для Si и CdTe

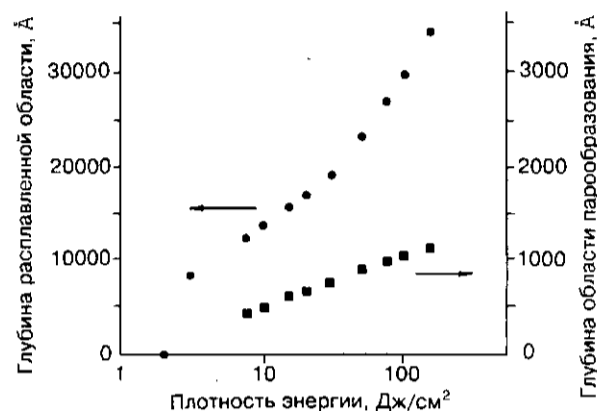


Рис. 2. Расчетная глубина плавления и парообразования кремниевой мишени под действием лазерного облучения с  $\tau_1 = 7$  нс

Наиболее полно поставленной задаче удовлетворяет лазер на  $N_2$ , имеющий длину волны 0,34 мкм, с энергией фотона 3,65 эВ. Поглощение света происходит в приповерхностном слое глубиной, приблизительно равной  $10^{-2} - 10^{-1}$  мкм, для кремния и соединения кадмий–теллур.

В настоящей работе с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) мы провели исследование зоны термического поражения в CdHgTe ( $T_{пл} = 450 - 600$  °C) и Si ( $T_{пл} = 1420$  °C) вблизи лазерных кратеров микронных диаметров при ультрафиолетовом облучении наносекундными импульсами. В исследованиях использовались фрагменты реальных кристаллов:

Кремний {100} покрыт термическим окислом толщиной 1000 Å и сверху защитным пиролитическим окислом, суммарная толщина окисла 1,5 мкм, проводимость *p*-типа с концентрацией дырок  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>.

КРТ-пленка толщиной около 10 мкм на монокристаллическом GaAs выращена методом молекулярно-лучевой эпитаксии, покрыта защитными низкотемпературными диэлектриками SiO<sub>2</sub> толщиной 0,1 мкм и Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> толщиной 0,05 мкм.

Для сравнения использовался монокристаллический InSb ( $T_{пл} = 525$  °C).

В экспериментах применялся лазер на  $N_2$  с продолжительностью импульса 7 нс, длиной волны 0,34 мкм, частота следования импульсов и их количество для каждого опыта сведены в таблицу.

Исходный лазерный луч имел эффективный диаметр 2 мм, из его центральной части диафрагмой диаметром 226 мкм выделялся участок, который фокусировали в пятно диаметром 3,6 мкм. Плотность энергии импульса на мишени составила 1,1 Дж/см<sup>2</sup>. При вычислении энергии импульса использовали измеряемую величину энергии исходного импульса, эффективную площадь исходного луча, площадь диафрагмы и данные по пропусканию объектива. Диаметр диафрагмы был на порядок меньше диаметра исходного луча, следовательно, распределение плотности энергии в прошедшем через диафрагму излучении было приблизительно равномерным.

Плотность мощности подбирается так, чтобы уже при первых импульсах на поверхности образца начинал образовываться кратер, окончательно формирующийся после 50–100 импульсов. Данный режим является минимально возможным для лазерного скрайбинга поверхности мишени. При дальнейшем снижении мощности возникает режим «лазерной полировки», при котором происходит плавление поверхности с последующей кристаллизацией под ориентирующим воздействием монокристаллической подложки без образования кратера.

Все экспериментальные данные, измеренные по СЭМ-фотографиям, представлены в виде таблицы, в которой указаны расстояния от оси лазерного кратера до соответствующей характерной области на поверхности: а) край кратера на уровне поверхности; б) наружный край оплавленной поверхности вокруг кратера; в) край неповрежденного диэлектрика. Указаны условия проведения опытов и даны пояснения.

При условии постоянства параметров лазерного излучения различие в образованных кратерах на исследуемых материалах обуславливается только особенностями их физических свойств, таких как: коэффициент температуропроводности, коэффициент поглощения света, температура плавления. Таким образом, практический результат решения системы уравнений (1) и (2) дает нам две характерные зоны: зону удаленного материала (кратер), определяемую формулой (1), и зону проникновения теплового воздействия (оплавленная поверхность), определяемую формулой (2), при условии  $l_s < l_d$ . Зону оплавленной поверхности мы определяем по внешней границе образованного «буртика» из выброшенного расплавленного материала (из зоны взаимодействия лазерного излучения с материалом мишени), так как расплав не разливается на те участки поверхности, где температура не достигает температуры плавления.

При проведении экспериментов мы также учитывали, что в точке плавления КРТ давление паров ртути составляет около 16 атм., а описываемые

Материал	Расстояние от центра кратера до края кратера, мкм	Расстояние от центра кратера до края оплавленной поверхности мишени, мкм	Расстояние от центра кратера до рамки диэлектрика, мкм	Количество импульсов	Примечание
Si	2,0 1,7	3,0 4,0	5,5 6,4	2 100	Диэлектрик высокотемпературный и защитный, толщина 1,5 мкм
InSb	1,2 1,7 1,9 1,8	2,2 2,6 3,65 5,5		1 2 5 100	После полирующего травления, без диэлектрика
CdHgTe	1,4 1,5 1,6	2,1 2,3 2,7	3,0 3,0 3,5	1 2 5	Диэлектрик низкотемпературный, толщина 0,15 мкм

здесь опыты проводились при атмосферном давлении, и, следовательно, в зоне переплава состав быстро изменяется в сторону CdTe после нескольких импульсов.

Поведение  $\text{SiO}_2$  как на Si, так и на CdHgTe аналогично и обусловлено тем, что окисел прозрачен для данной длины волны. После начала парообразования из материала мишени под действием лазерного облучения диэлектрик срывается избыточным давлением паров.

На рис. 3 представлено формирование начальных стадий лазерных кратеров после 1, 2 и 5 импульсов для поверхностей мишеней из CdHgTe, InSb и Si при равном увеличении и равной плотности энергии лазерного излучения. На CdHgTe кратеры окружены областями, в которых отсутствует защитный диэлектрик. На рис. 3, с (мишень кремний с окислом) виден лазерный кратер с линзообразным выколом в окисле после двух импульсов.

На рис. 4 представлены СЭМ-фотографии, сделанные после 100-импульсного облучения мишеней из InSb и Si.

На СЭМ-фотографиях поверхностей CdHgTe и InSb (рис. 3, а, б) для случая одиночного импульса видно, что формируется начальный кратер несколько меньших размеров, чем при двух- и пятикратных воздействиях. Однако испарившегося материала мишени всегда достаточно для того, чтобы сорвать окисел над местом воздействия лазерного излучения (см. рис. 3, а). На рис. 3, с (мишень Si) отражена ситуация, состоящая в том, что давления паров при двух импульсах оказывается не всегда достаточно, чтобы вскрыть окисел на кремнии, хотя и наблюдается его вспучивание. Во время проведения опытов было замечено, что после трех пачек по два импульса с частотой 10 имп./с окисел вскрывается всегда, а при одиночном воздействии с периодом следования 1 с окисел не вскрывается никогда. При количестве одиночных импульсов более нескольких десятков визуально наблюдается изменение цветности. Увеличение размеров кратера по мере увеличения числа импульсов от 1 до 5 можно объяснить тем, что довольно значительное отражение света от плоской гладкой исходной поверхности уменьшается по мере следующих одна за другой перекристаллизаций с образованием сложного профиля [3, 4]. У сформировавшегося кратера (100 имп., 1 с) входное отверстие становится практически черным телом, поглощающим всю проходящую энергию. Однако после окончания действия импульса образовавшийся расплав в точке плавления не успевает весь выйти наружу и застывает на боковых поверхностях кратера. Это приводит к видимому уменьшению диаметра входного отверстия.

Обращает на себя внимание то, что диаметры кратеров и диаметры оплавленных областей рассматриваемых материалов отличаются незначительно. Это подтверждает, что эффективные расстояния распространения тепла при импульсном нагреве имеют субмикронные размеры.

Полученная величина  $1,1 \text{ Дж/см}^2$  хорошо согласуется с результатами работы [5] с учетом того, что длина волны в нашем случае составляла  $0,34 \text{ мкм}$ , а в [5] –  $1,06 \text{ мкм}$ . Это приводит для Si к большей эффективности теплового воздействия вследствие более высокого коэффициента поглощения света, тогда как для CdHgTe из-за высокого коэффициента поглощения света и для длины волны  $1,06 \text{ мкм}$  это обстоятельство несущественно. Различия в результатах расчета [1] и измерения [5] критической плотности мощности могут быть также обусловлены тем, что эксперименты в работе [5] проводились на реальных образцах Si со сложной топологией, при этом

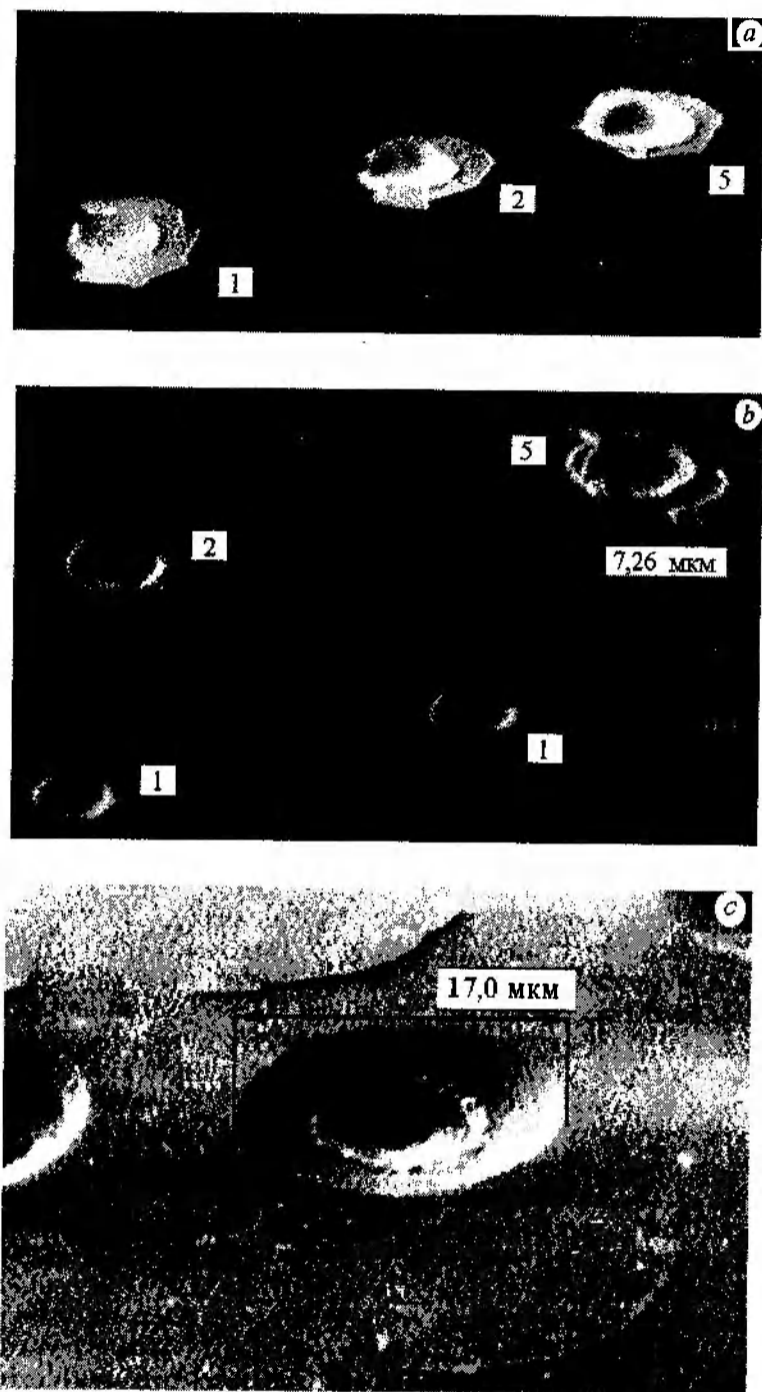


Рис. 3. Лазерные кратеры на CdHgTe (a) и InSb (b) при диаметре луча 3,6 мкм и указанном количестве импульсов; лазерный кратер на Si (c)

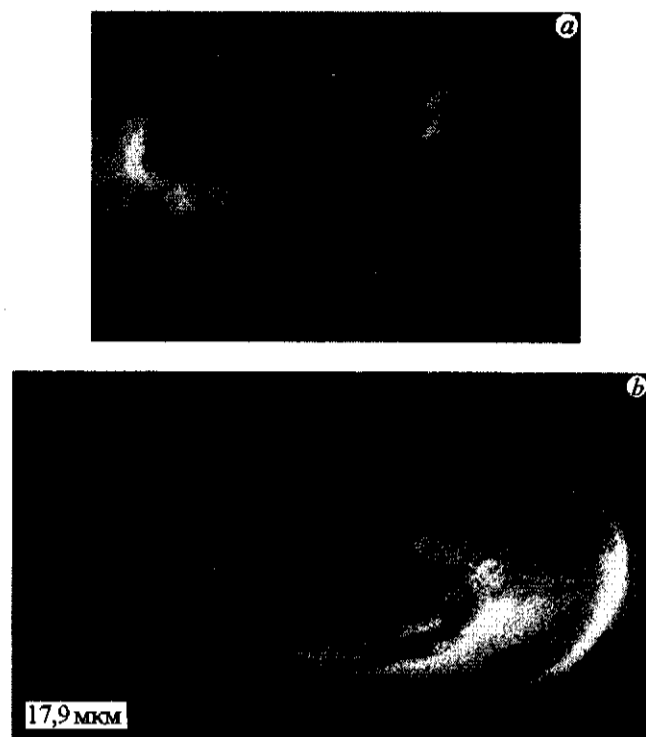


Рис. 4. Отверстия после лазерного излучения в InSb (a) и SiO<sub>2</sub>/Si (b)

сравнительно большой диаметр лазерного пятна (400 мкм) охватывал большое количество топологических элементов. Последнее обстоятельство обычно приводит к снижению необходимой критической плотности мощности. Сопоставляя наши результаты с теоретическими зависимостями, показанными на рис. 2, видим, что при плотности энергии незначительно больше пороговой существует область, в которой испарение практически отсутствует, тогда как плавление происходит. По мере повышения плотности энергии, наряду с плавлением, происходит и испарение материала. Мы используем такой режим, при котором происходит формирование кратеров и присутствует как жидкая фаза, так и испарение облученного материала при минимально необходимой плотности излучения. Благодаря подобранному режиму, область вокруг линии лазерного скрайба минимально повреждается, что иллюстрируется [6].

Подобранный нами режим лазерного ультрафиолетового излучения наносекундной длительности вызывает минимально возможные изменения материала мишени, что позволяет проводить неповреждающие лазерные работы вблизи электронных элементов микросхем на Si и CdHgTe.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lui X., Du D., Mongrou G.** Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses // IEEE J. Quantum Electron. 1997. 33, N 10. P. 1706.
2. **Зи С.** Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984.
3. **Баскин Б. Л., Поляков А. А., Турухин В. Н.** Воздействие импульсного лазерного излучения пикосекундной длительности на поверхность германия // Письма в ЖТФ. 1985. 11, вып. 20. С. 1251.
4. **Бугаев А. А. и др.** Ячеистая структура рельефа поверхности кремния при плавлении пикосекундными импульсами // Письма в ЖТФ. 1986. 12, вып. 4. С. 220.
5. **Zhang Ch., Watkins S. E., Walser R. M., Becker M. F.** Laser-induced damage to silicon charge-coupled imaging devices // Opt. Eng. 1991. 30, N 5. P. 651.
6. **Новоселов А. Р., Клименко А. Г., Воинов В. Г., Недосекина Т. Н.** Теоретические ограничения и результаты приближения лазерной стенки на микронные расстояния к *p-n*-переходам в кремнии // Тр. Третьей Всерос. науч.-техн. конф. Таганрог: ТГРУ, 1996.

*Поступила в редакцию 25 мая 1998 г.*

---

**Реклама продукции в нашем журнале – залог Вашего успеха!**