

бенсон М.Н., Макин В.С., Пудков С.Д., Трубачев В.В. // Известия АН СССР, Сер. физ. 1982. Т. 46. В. 6. С. 1186-1193.

- [2] Вейко В.П., Дорофеев И.А., Имас Я.А., Калугина Т.И., Либенсон М.Н., Шандыбина Г.Д. // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 1. С. 15-20.
- [3] Хакеи Г. Синергетика: М.: Мир, 1980.
- [4] Хакеи Г. Синергетика: Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985.
- [5] Гапонов-Грехов А.В., Ломов А.С., Осипов Г.В., Рабинович И.И. // В сб.: Нелинейные волны. Динамика и эволюция. М.: Наука, 1989. С. 61-83.

Институт общей физики
АН СССР,
Москва

Поступило в Редакцию
19 ноября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 2

26 января 1991 г.

06.2; 11

© 1991

ИМПЛАНТАЦИЯ МЫШЬЯКА В КРЕМНИЙ ИЗЛУЧЕНИЕМ МОЩНОГО KrF ЛАЗЕРА

В.Л. К а н ц ы р е в, Н.В. М о р о з о в,
Б.А. О л ь ш в а н г е р, П.Б. С е р г е е в,
М.А. Т ю н и н а

Проблема создания замкнутого процесса изготовления интегральных схем может быть решена сегодня методами лазерной технологии [1]. Среди множества используемых лазеров с широким диапазоном выходных параметров наиболее перспективными для задач микротехнологии нам представляются эксимерные лазеры, поскольку УФ излучение таких лазеров стимулирует фотохимические процессы травления и осаждения [2], а также, благодаря высокому коэффициенту поглощения большинством материалов в УФ области, обеспечивается возможность эффективного локального нагрева материалов и термоактивации процессов отжига, легирования, кристаллизации, абляции.

Но на пути к применению эксимерных лазеров в микротехнологии требуется решить ряд задач, среди которых обеспечение высокой производительности технологических процессов и детальное исследование физических основ этих процессов. Повышение производительности возможно, например, за счет увеличения длительности

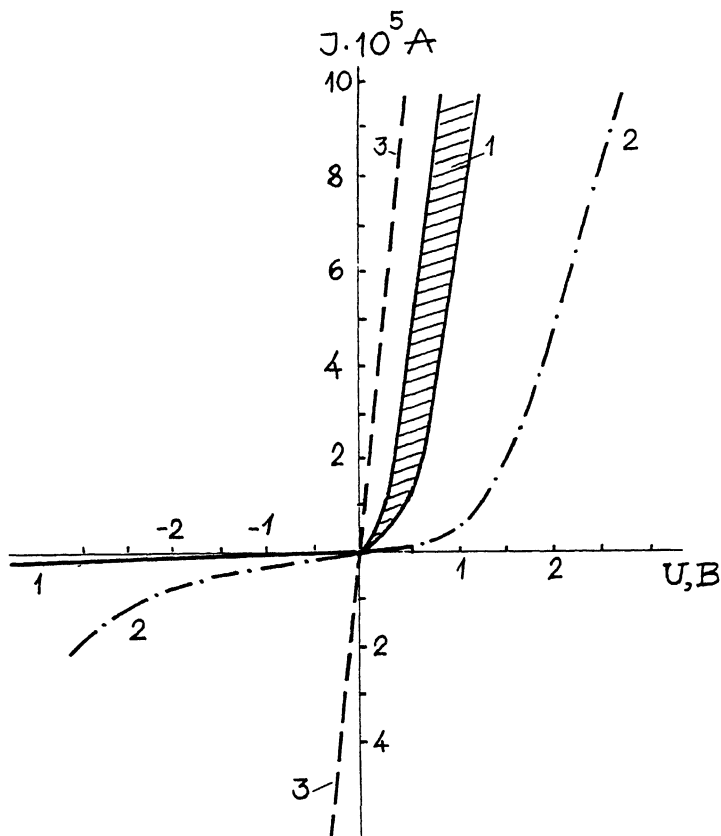


Рис. 1. Три группы вольт-амперных характеристик р-п-переходов, полученных лазерной имплантацией мышьяка в кремний при $1.0 < E < 2.5$ Дж/см² (1), при $3.0 < E < 3.5$ Дж/см² (2), при $3.5 < E < 5.0$ Дж/см² (3).

импульса лазерного излучения и увеличения энергии в импульсе при достаточно большой площади сечения лазерного пучка и высокой однородности излучения.

В данной статье впервые представлены результаты экспериментов по легированию кремния с помощью излучения высокопроизводительного электронно-пучкового лазера на KrF (248 нм) [3] с длительностью импульса 80 нс и энергией в импульсе до 10 Дж при площади воздействия до 2 см². При этом плотность энергии лазерного излучения на подложке E составляла от 0.5 до 5.0 Дж/см². В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния р-типа с концентрацией акцепторов

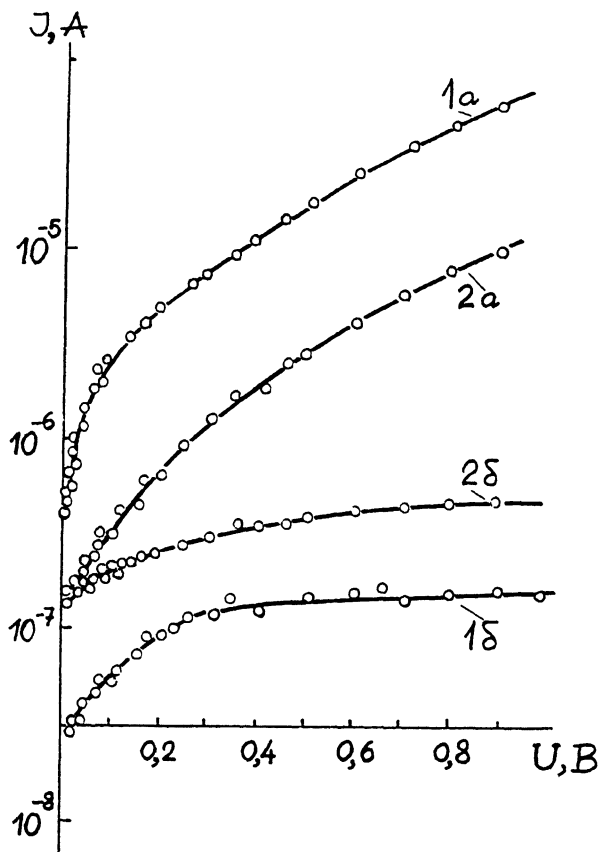


Рис. 2. Прямые (а) и обратные (б) ветви ВАХ р-п-переходов, полученных имплантацией мышьяка в кремний при $E = 1.5 \text{ Дж/см}^2$ (1) и при $E = 2.5 \text{ Дж/см}^2$ (2).

$N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, толщиной 300 мкм. Легирующая примесь—мышьяк — наносилась на подложку в вакууме по методике, описанной в [4, 5]. Толщина пленки As составляла от 10 нм до 50 нм. Имплантацию As из пленки в Si подложку проводили в одном цикле с формированием пленки в том же вакуумном объеме при комнатной температуре и давлении $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ в моноимпульсном режиме. Полученные имплантированные слои исследовались четырехзондовым методом по вольт-амперным характеристикам, а также методом нейтронно-активационного анализа с послойным травлением Si .

Нейтронно-активационный анализ областей воздействия лазерного излучения показал, что концентрация внедренной примеси максимальна в приповерхностном слое толщиной до 100 Å и падает

на два порядка величины на глубине до 1000 \AA . Для разных режимов облучения максимум концентрации мышьяка в кремнии (N_{As}) составлял от $1,3 \cdot 10^{18}$ до $1,5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. N_{As} не зависела от толщины пленки и возрастала при повышении E от 1,0 до $5,0 \text{ Дж/см}^2$. При $E < 1,0 \text{ Дж/см}^2$ обнаружить мышьяк в кремнии не удалось. Это пороговое для имплантации значение E близко к порогу плавления Si , рассчитанному по данным [6] и составляющему для указанных выше параметров лазерного излучения $0,7 \text{ Дж/см}^2$. Таким образом, можно предположить, что имплантация имеет место при плавлении Si , а легированные слои формируются в результате жидкофазной диффузии примеси. О жидкофазном механизме процесса свидетельствует и величина коэффициента диффузии примеси, определенная по глубине диффузии и времени существования расплава и равная примерно $10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$. Это значение отличается от максимальной величины коэффициента диффузии мышьяка в кремний в твердой фазе - $10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$ и соответствует жидкой фазе кремния.

Значения поверхностного сопротивления областей воздействия лазерного излучения, измеренные четырехзондовым методом, составили от 0,5 до $10,0 \text{ кОм/кв}$ для разных режимов облучения. По ним рассчитывалась средняя концентрация \bar{N} электрически активной примеси в узлах кристаллической решетки Si [7]. Анализ результатов показал, что N_{As} , определенная нейтронно-активационным методом, не превышает расчетных значений \bar{N} , что свидетельствует о полной активации примеси. Это подтверждается и результатами термообработки имплантированных слоев в режимах, исключающих перераспределение внедренной примеси: изменений электрических параметров образцов после отжига $900 \text{ }^\circ\text{C}$ в среде аргона в течение (0,5 ... 2,0) часов не обнаружено.

Исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) р-п-переходов, сформированных лазерной имплантацией мышьяка в кремний, показали, что как по прямой, так и по обратной ветвям характеристики можно разделить на три группы, соответствующие трем интервалам значений плотности энергии лазерного излучения (рис. 1). Наиболее близкими к характеристикам идеального диода являются ВАХ р-п-переходов, полученных облучением с E от 1,0 до $2,5 \text{ Дж/см}^2$. Для второй группы структур, сформированных при $E = 3,0 \dots 3,5 \text{ Дж/см}^2$, характерно значительное увеличение обратных токов и уменьшение токов при малых прямых смещениях. Третья группа образцов с имплантацией при $3,5 < E < 5,0 \text{ Дж/см}^2$ демонстрирует почти полную деградацию характеристик.

Остановимся подробнее на ВАХ первой группы (рис. 2). Коэффициент неидеальности составляет для прямых ветвей ВАХ рассматриваемой группы р-п-переходов величину от 1,3 до 1,7. Уменьшение тока при небольшом прямом смещении переходов, сформированных при $E = 2,5 \text{ Дж/см}^2$, по сравнению с прямыми токами переходов, полученных при E от 1,0 до $2,0 \text{ Дж/см}^2$, можно объяснить увеличением тока рекомбинации в области объемного заряда.

Это связано, вероятно, с началом образования при $E = 2.5 \text{ Дж/см}^2$ дефектов и дополнительных центров рекомбинации. Ток насыщения, рассчитанный в приближении диода с длинной базой, составляет примерно $5 \cdot 10^{-11} \text{ А}$, что на три порядка меньше экспериментально наблюдаемого обратного тока. Известно, что обратный ток определяется в основном током генерации в области объемного заряда, слабо зависит от обратного смещения и увеличивается с ростом ширины области объемного заряда и концентрации центров генерации-рекомбинации. Отличие его от расчетного значения может быть связано также с неоднородным распределением концентрации легирующей примеси в квазинейтральных областях. Анализ хода обратной ветви ВАХ диодов первой группы указывает на мягкий туннельный пробой р-п-переходов, который особо наглядно демонстрируется обратной ветвью ВАХ диода, полученного имплантацией при $E = 2.5 \text{ Дж/см}^2$, с наибольшей в этой группе концентрацией внедренной примеси.

Туннельный механизм пробоя присущи р-п-переходам второй группы. Увеличение примесной концентрации здесь по сравнению с первой группой должно было бы привести к увеличению пробивных напряжений. Наблюдаемая же картина совершенно противоположна (рис. 1). Резкий рост обратных токов и снижение пробивных напряжений мы связываем с формированием при воздействии на подложку лазерного излучения с $E > 3.0 \text{ Дж/см}^2$ дефектов в приповерхностных слоях кремния и в области р-п-переходов. При $E > 3.5 \text{ Дж/см}^2$ генерация дефектов, стимулированная лазерным излучением, становится катастрофической и приводит к полной деградации характеристик р-п-переходов.

Таким образом, в работе показана возможность формирования имплантацией мышьяка в кремний с помощью излучения мощного KrF лазера диодных мезоструктур. Результаты экспериментов позволяют считать эффективным использование лазеров такого типа не только в технологических процессах на базе фотохимических реакций, но и для создания поперечной структуры элементов интегральных схем с субмикронными размерами, подтверждая перспективность применения эксимерных лазеров в микротехнологии.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов. М., 1986. 502 с.
- [2] Ахманов А.С. // Итоги науки и техники, Сер. Физические основы лазерной и пучковой технологии. 1989. Т. 3. С. 4-39.
- [3] Бучнев В.М., Клементов А.Д., Сергеев П.Б. // Квантовая электроника, 1983, Т. 10. С. 2048-2053.
- [4] Ольшвангер Б.А. А.с. 483042 СССР. Б.И. 1986. № 10. С. 291.
- [5] Капендарев Р.И., Ольшвангер Б.А., Сазионов А.И., Эйдус Я.А. А.с. 763841 СССР. Б.И. 1980. № 34. С. 290.

[6] П у з р е в В.А., Г е р а с и м о в а А.С. // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 4. С. 56-76.

[7] М а л л е р Р., К е й м и н с Т. Элементы интегральных схем. М., 1989. 630 с.

Научно-исследовательский институт технического стекла, Москва

Поступило в Редакцию 1 августа 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 17, вып. 2

26 января 1991 г.

05.4

© 1991

ВОЛЬТАМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ТЕПЛОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В ОБЛАСТИ РЕЗИСТИВНОГО СОСТОЯНИЯ ВТСП КЕРАМИК $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$

Т.А. И г н а т ь е в а, А.Н. В е л и к о д н ы й,
М.А. Т и х о н о в с к и й

Отличительной чертой ВТСП керамик являются высокие значения температуры сверхпроводящего перехода (T_K) и сравнительно небольшие критические токи (I_K) при азотных температурах.

Критические токи (I_K) ограничиваются слабыми связями между отдельными зёрнами [1]. Их природа определяет чувствительность критических параметров ВТСП керамик, в частности I_K , к магнитным полям и температурам.

Одним из методов изучения природы разрушения сверхпроводимости ВТСП керамик как под влиянием магнитных полей, так и транспортных токов является анализ ВАХ.

В данной работе исследованы ВАХ образцов из керамики $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$, приготовленных обычной керамической технологией. Типичная ВАХ для одного из образцов с $\rho_{300K} = 2.6 \cdot 10^{-3}$ Ом·см,

$J_K = 160$ А/см² и $T_K \sim 91$ К, содержащая характерные особенности, приведена на рис. 1, а. Как видно из рисунка, на ВАХ наблюдаются две особенности, связанные с появлением резистивного состояния в слабых связях при разрушении ВТСП током. Одна из них – нелинейность начального участка ВАХ в интервале токов от I_K до $1.6 I_K$, другая – неустойчивость при токах более $1.6 I_K$, которая заканчивается резким срывом в устойчивое состояние при токе I^* . Устойчивая часть ВАХ при $I > I^*$ имеет нелинейный характер, а для наиболее однородных образцов близкий к линейному вплоть до теплового срыва, сопровождающегося расплавлением образца при токах $(15-20) I_K$.

На рис. 1, б приведены измерения температуры образца относительно азота $\Delta T = T_{обр} - 77$ К в зависимости от транспорт-