

5. Левицкий Ю. Т., Иванов Г. А.— ФММ, 1969, т. 28, № 5, с. 804.

6. Иванов Г. А., Левицкий Ю. Т.— Уч. зап. ЛГПИ имени А. И. Герцена, 1968, т. 384, № 4, с. 21.

7. Иванов Г. А., Грабов В. М., Михайличенко Т. В.— В сб.: Физика твердого тела. Л., 1973, с. 68.

Поступила в редакцию
07.05.81.

Кафедра физики твердого тела

УДК 621.315

Ф. Ф. КОМАРОВ, Э. М. ШПИЛЕВСКИЙ,
П. И. ГАЙДУК, Д. А. ГОРБАЧЕВСКИЙ

ХАРАКТЕРИСТИКИ $p-n$ -ПЕРЕХОДОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ОТЖИГЕ ИОНОЛЕГИРОВАННЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ

Свойства ионолегированных полупроводниковых слоев, отожженных лазерными импульсами наносекундной длительности, в значительной степени определяются величиной плотности энергии W в импульсе [1, 2]. Изменение этого важного параметра от импульса к импульсу является причиной, сдерживающей использование лазерного излучения для отжига полупроводниковых структур. Преодолеть это затруднение можно, во-первых, путем создания высокостабильного лазера и, во-вторых, найдя такие интервалы плотностей энергии, в которых свойства отожженных слоев меняются незначительно. В данной работе задача оптимального режима отжига решается на примере кремния, облученного большими дозами сурьмы; в этом случае можно получить концентрацию примеси в положении замещения, на порядок превышающую предел ее растворимости в равновесных условиях [3, 4].

Пластины кремния марки КДБ-0,3, вырезанные по плоскости (111), облучались ионами сурьмы с энергией $E=60$ кэВ, дозами $D=6,2 \cdot 10^{15}$ и $1,3 \cdot 10^{16}$ ион/см². Имплантация производилась на стандартной установке «Везувий-1». Для отжига аморфизированных слоев применяли рубиновый лазер с модулированной добротностью ($\lambda=0,694$ мкм, $\tau=25$ нс). Плотность энергии в импульсе изменяли с помощью подбора расстояния линза — образец от 0,3 до 2,5 Дж/см². Структурные превращения в ионолегированных слоях изучали с помощью методов просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и дифракции. Изменение электрофизических свойств контролировалось путем измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ).

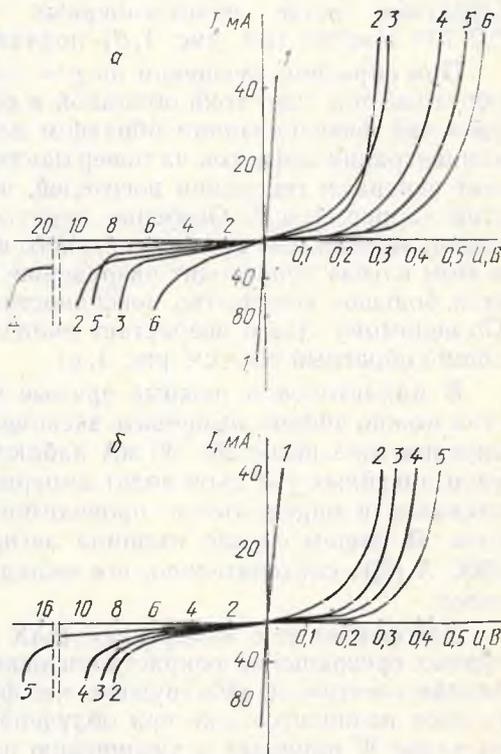


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики $p-n$ -переходов, полученных при различных режимах лазерного отжига ионолегированных слоев:

а) $D=1,3 \cdot 10^{16}$ ион/см²: 1 — неотожженный слой; 2 — $W=0,44$ Дж/см²; 3 — $W=0,85$ Дж/см²; 4 — $W=1,1$ Дж/см²; 5 — $W=1,8$ Дж/см²; 6 — $W=2,5$ Дж/см²; б) $D=6,2 \cdot 10^{15}$ ион/см²: 1 — неотожженный слой; 2 — $W=0,44$ Дж/см²; 3 — $W=0,75$ Дж/см²; 4 — $W=0,85$ Дж/см²; 5 — $W=1,1$ Дж/см².

Из сравнения рис. 1, *а, б*, где показаны ВАХ $p-n$ -переходов, полученных при различных режимах отжига, видно, что увеличение дозы внедренных ионов приводит к незначительному изменению вида характеристик. Данный результат можно понять из следующих соображений. При имплантации сурьмы дозами $6,2 \cdot 10^{15}$ — $1,3 \cdot 10^{16}$ ион/см² концентрация примеси на глубине среднего проекционного пробега имеет величину порядка $(2-4) \cdot 10^{21}$ ат/см³ [5], что в 30—60 раз превышает максимальный предел растворимости сурьмы в кремнии в равновесных условиях. Проведенные ранее измерения поверхностной проводимости при послыоном снятии анодноокисленных слоев показали [6], что концентрация электроактивной примеси после импульсного лазерного отжига не превышает $4 \cdot 10^{20}$ ат/см³. Следовательно, суммарное количество активированной примеси во всем слое одинаково для обеих доз (при условии одинаковых режимов отжига), поэтому различия вольт-амперных характеристик будут зависеть только от структурного совершенства слоев. Этот вывод подтверждается поведением обратных ветвей характеристик.

На рис. 1, *а* представлены ВАХ $p-n$ -переходов, полученных при имплантации сурьмы дозой $1,3 \cdot 10^{16}$ ион/см² и отожженных лазером с различными плотностями энергии. Видно, что при увеличении плотности энергии в интервале от 0,4 до 0,9 Дж/см² напряжение пробоя изменяется незначительно, при W выше 1,1 Дж/см² наблюдается увеличение напряжения пробоя до 19—25 В. Однако при облучении лазерными импульсами с плотностью энергии выше некоторой пороговой W (в нашем случае 1,7—1,8 Дж/см²) наблюдается повреждение поверхности, которое, вероятно, является причиной снижения напряжения пробоя в два—три раза. Обратные ветви вольт-амперных характеристик в случае дозы $6,2 \cdot 10^{15}$ ион/см² (см. рис. 1, *б*) подчиняются этим же закономерностям.

При обратном смещении на $p-n$ -переходе основной вклад в общий обратный ток дают токи объемной и поверхностной генерации. Величина тока при фиксированном обратном напряжении тем больше, чем выше концентрация дефектов на поверхности и в объеме, так как дефекты служат центрами генерации носителей, что согласуется с ходом зависимостей на рис. 1, *а, б*. Особенно заметно увеличение обратного тока при использовании для отжига лазерного импульса с $W=2,5$ Дж/см², так как в этом случае происходит разрушение поверхности образца, т. е. появляется большое количество поверхностных и приповерхностных дефектов. По-видимому, здесь возрастает вклад тока поверхностной генерации в общий обратный ток (см. рис. 1, *а*).

В миллитокровом режиме прямые ветви вольт-амперных характеристик можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью. При увеличении тока выше 20—30 мА наблюдается линейная зависимость. Наклон линейных участков вольт-амперных характеристик приблизительно одинаков и определяется проводимостью подложки и легированного слоя. В нашем случае толщина легированного слоя невелика (1500—3000 Å [6]), следовательно, его вклад в общую проводимость незначителен.

Одновременно с измерением ВАХ проводилось исследование структурных превращений рекристаллизованных слоев методами ПЭМ и дифракции электронов. Обнаружено, что формирование поликристаллического слоя начинается уже при облучении лазером с $W=0,3$ Дж/см². Возрастание W приводит к увеличению размеров кристаллитов и сильному микродвойникованию (рис. 2, *а, б*). Дальнейшее увеличение W вызывает эпитаксиальную рекристаллизацию как в случае дозы $6,2 \cdot 10^{15}$ ион/см², так и в случае дозы $1,3 \cdot 10^{16}$ ион/см². Однако формирование вторичных дефектов при этом происходит неодинаково: отжиг образцов, имплантированных меньшими дозами, приводит к относительно малodefектным областям (рис. 2, *в*). Здесь обнаружены дислокационные петли двух видов: одни лежат в приповерхностной области и декорированы примесью, другие расположены глубже и имеют более четкий контраст. С повыше-

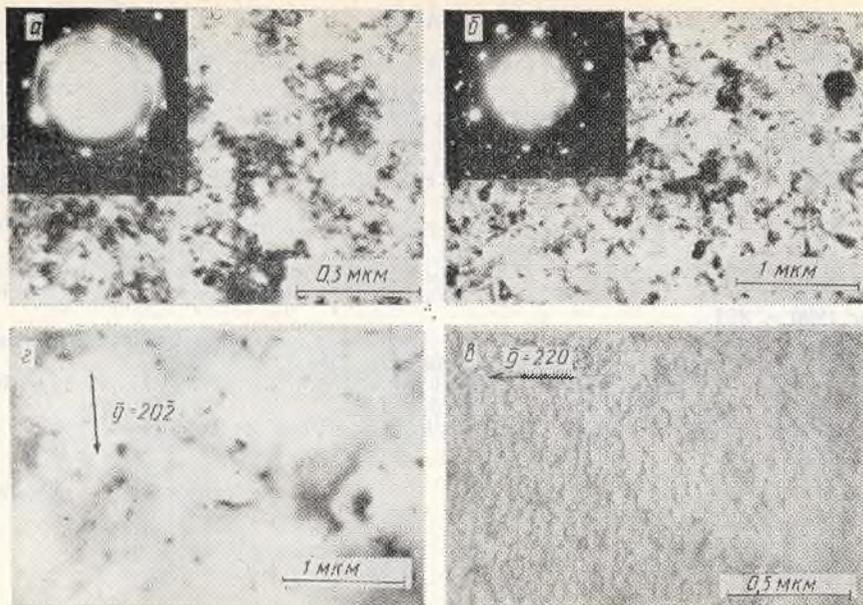


Рис. 2. Структурные изменения ионолегированных слоев при различных режимах отжига:

a — $D=6,2 \cdot 10^{15}$ ион/см², $W=0,4$ Дж/см²; *б* — $D=1,3 \cdot 10^{16}$ ион/см², $W=0,8$ Дж/см²; *в* — $D=6,2 \cdot 10^{15}$ ион/см², $W=1,1$ Дж/см²; *г* — $D=1,3 \cdot 10^{16}$ ион/см², $W=1,1$ Дж/см²

нием плотности энергии до 1,3 Дж/см² дислокационные петли первого типа исчезают, что можно объяснить диффузией сурьмы в глубину кристалла. При увеличении дозы до $1,3 \cdot 10^{16}$ ион/см² дефектность структуры сильно возрастает (рис. 2, *г*). На микрофотографии наблюдаются дислокации и дислокационные петли, сильно декорированные сурьмой. Повышение плотности энергии до 1,3 Дж/см² снижает дефектность структуры, однако полностью ее не устраняет. Отжиг с плотностью энергии, превышающей 1,7 Дж/см², приводит к частичному или полному повреждению поверхности образцов. Кроме того, увеличение W сопровождается значительным возрастанием содержания кислорода в приповерхностных слоях. Загрязнение кремния кислородом в процессе лазерного отжига на воздухе и в атмосфере кислорода изучалось в работе [7] методом масс-спектрографии вторичных ионов. Авторы работы [8] наблюдали образование αSiO_2 методами ПЭМ. В этом случае для появления окисла был необходим последующий термический отжиг в интервале температур 700—800 °С.

Наблюдается хорошее соответствие электрофизических характеристик с результатами структурных исследований. Облучение имплантированных слоев импульсами с плотностью энергии 1,1—1,6 Дж/см² приводит к возможности получать $p-n$ -переходы с высокими напряжениями пробоя. Одновременно достигается достаточно совершенная структура рекристаллизованных слоев.

Таким образом, в результате исследований определен оптимальный режим получения $p-n$ -переходов с помощью лазерного отжига монокристаллов кремния, ионолегированного сурьмой. Установлено, что наиболее качественные $p-n$ -переходы образуются при имплантации сурьмы дозой $6,2 \cdot 10^{15}$ ион/см² и последующем отжиге лазером с плотностью энергии 1,1—1,6 Дж/см². Увеличение дозы легирования до $1,3 \cdot 10^{16}$ ион/см² не приводит к существенному изменению ВАХ, однако дефектность структуры в оптимальном режиме отжига возрастает.

В заключение авторы выражают благодарность Белобровику В. И. за помощь при проведении лазерного отжига.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хайбуллин И. Б., Штырков Е. И., Зарипов М. М., Галаяутдинов М. Ф., Баязитов Р. М. Отжиг ионолегированных слоев под действием лазерного излучения.— Рукопись деп. в ВИНТИ, № 2061-74. Деп. от 06.07.74.
2. Хайбуллин И. Б., Штырков Е. И., Зарипов М. М.— Изв. АН СССР. Физика, 1981, т. 45, № 8, с. 1464.
3. White C. W., Wilson S. R., Appleton B. R., Young F. W.— J. Appl. Phys., 1980, v. 51, № 1, p. 738.
4. Natsuaki N., Tamura M., Tokuyama T.— J. Appl. Phys., 1980, v. 51, № 1, p. 738.
5. Буренков А. Ф., Комаров Ф. Ф., Кумахов М. А., Темкин М. М. Таблицы параметров пространственного распределения ионоимплантированной примеси.— Минск, 1980, с. 352.
6. Гайдук П. И., Комаров Ф. Ф.— Тез. докл. XII совещания по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. М., 1982, с. 129.
7. Koichiro Hoh, Hiroshi Koyama, Keiichiro Uda, Yoshio Miura.— Jap. J. Appl. Phys., 1980, v. 19, № 7, p. L375.
8. Garulli A., Servidoli M., Veechi I.— J. Phys. D: Appl. Phys., 1980, v. 13, № 10, p. L199.

Поступила в редакцию
07.06.82.

НИИ ПФП, кафедра ФТТ

УДК 538

В. В. ГУСАКОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ СОГЛАСОВАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА РАДИОСПЕКТРОМЕТРА

Величина регистрируемого сигнала электронного парамагнитного резонанса в спектрометре ЭПР зависит от параметров исследуемого образца (концентрация парамагнитных центров, величина мощности насыщения и т. д.) и от конструктивных характеристик спектрометра (мощность СВЧ-генератора, добротность измерительного резонатора, параметры связи резонатора с СВЧ-трактом, тип детектора). Задача установления зависимости величины сигнала от характеристик СВЧ-элементов спектрометра и параметров образца для ряда ограниченных случаев решалась в [1, 2]. Для спектрометров с проходным измерительным ре-

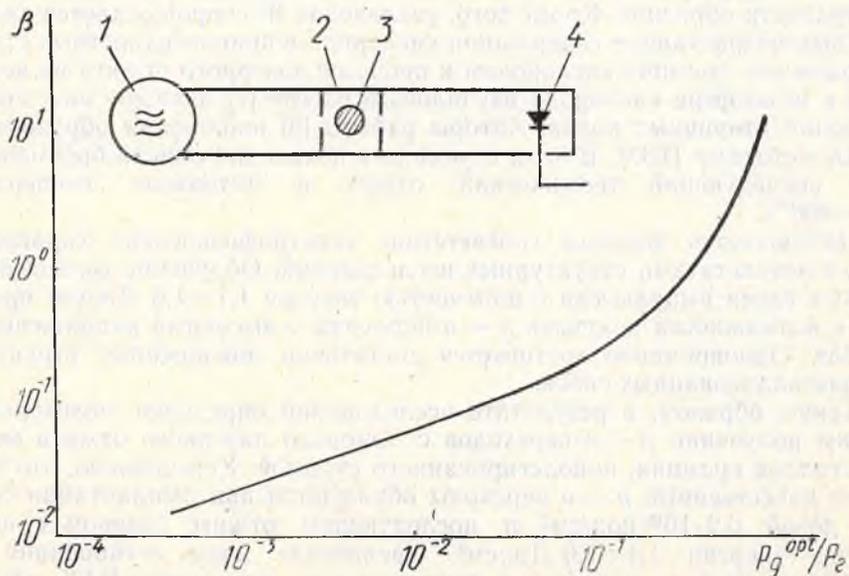


Рис. 1. Номограмма оптимальных по току детектора значений и схема СВЧ-тракта спектрометра ЭПР с проходным измерительным резонатором:

1 — генератор; 2 — измерительный резонатор; 3 — образец; 4 — детектор