

ЛОКАЛЬНОЕ ПОВЕРХНОСТНОЕ ПЛАВЛЕНИЕ ИОННО-ИМПЛАНТИРОВАННОГО КРЕМНИЯ

А. И. Плотников, С. И. Рембеза, В. А. Логинов, А. П. Дорофеев

В работах [1-5] показано, что при импульсном нагреве монокристаллических полупроводников некогерентным излучением на начальной стадии плавления наблюдается формирование на поверхности материала локальных областей жидкой фазы, последующая кристаллизация которых приводит к образованию характерных фигур. Форма областей локального плавления (ОЛП) обусловлена анизотропией теплофизических свойств материала [1, 3], вследствие чего на плоскостях (111) и (100) образцов наблюдаются соответственно треугольные и квадратные ОЛП. Островки жидкой фазы могут иметь макроскопические размеры (до 1700 мкм) [5]; в этой связи следует ожидать, что процесс формирования ОЛП связан со структурой объема материала и не должен зависеть от модификации тонкого приповерхностного слоя полупроводника. В настоящей работе показано, что внесение нарушений при ионной имплантации примесей на глубину, не превышающую 1 мкм, оказывает существенное влияние на характер формирования ОЛП в условиях импульсного нагрева полупроводников.

В качестве объектов исследования использовались пластины монокристаллического кремния ориентации (111) марок КЭФ-0.3, легированные ионами бора с энергией 120 кэВ при дозе $6 \cdot 10^{14}$ см⁻², и КДБ-10, легированные ионами сурьмы с энергией 80 кэВ при дозе $5 \cdot 10^{15}$ см⁻² и ионами мышьяка с энергией 100 кэВ при дозе 10^{16} см⁻². Часть ионно-имплантированных образцов подвергалась гомогенизирующему отжигу при температуре $T=1333$ К в течение 70 мин в атмосфере азота. Формирование областей локального плавления осуществлялось путем воздействия на пластины моноимпульсов излучения ксеноновых ламп в режимах, аналогичных приведенным в работе [5].

В результате импульсного нагрева некогерентным излучением на поверхности неимплантированных образцов формировались ОЛП треугольной формы (рисунок, а). Ионная имплантация бора, сурьмы и мышьяка в пластины кремния приводит к трансформации фигур плавления. Имплантация бора вызывает формирование ОЛП гексагональной формы (рисунок, б); на образцах, легированных мышьяком, наблюдалось образование ОЛП овальной формы (рисунок, в), аналогичные фигуры плавления формируются на пластинах, легированных сурьмой.

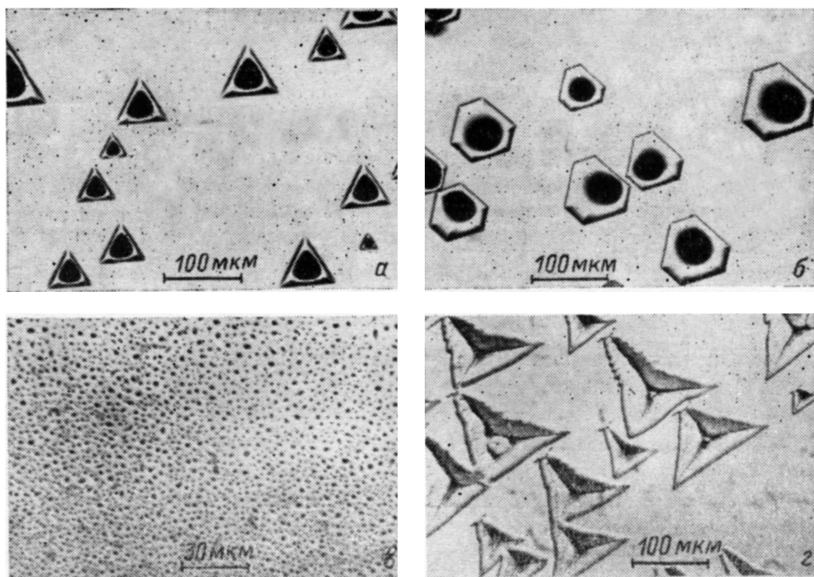
Вторая стадия исследования включала облучение образцов, предварительно подвергнутых изотермическому отжигу. В результате термообработки и последующего импульсного нагрева пластин, легированных бором и сурьмой, форма ОЛП не претерпела существенных изменений; на образцах, имплантированных ионами мышьяка, наблюдались трансформация фигур плавления из овалов в незначительно деформированные треугольники (рисунок, г).

Форма ОЛП определяется кристаллографической структурой материала, поэтому естественно связать изменение характера процесса формирования локальных областей жидкой фазы с деформацией решетки кремния в результате ионного легирования. Известно, что радиационные дефекты в кремнии отжигаются при сравнительно низких температурах 900—1100 К [6]. Если бы основной причиной изменения формы ОЛП в результате ионного легирования являлись радиационные дефекты, то после отжига при $T=1333$ К ОЛП должны были бы иметь треугольную форму, характерную для неимплантированных образцов.

Причину трансформации ОЛП в результате ионной имплантации примесей, по-видимому, следует искать в особенностях структурной перестройки нарушенного слоя кремния при тепловом воздействии. Известно, что отжиг радиационных дефектов ионно-имплантированных слоев сопровождается образованием дислокаций, дислокационных петель, плоскостных и линейных включений вакансий, междоузельных и примесных атомов [6]. Аналогичные дефекты образуются также при импульсной обработке ионно-имплантированных слоев [7]. Таким образом, к моменту начала процесса зарождения жидкой фазы в условиях импульсного нагрева происходит перестройка радиационных дефектов с образованием дислокаций, дислокационных петель и т. д. В таком случае отсутствие влияния предварительного изотермического отжига на форму ОЛП образцов, легированных бором и сурьмой, можно объяснить следующим. Как при изотермическом отжиге, так и в процессе действия импульса излучения формируются дефекты, уменьшающие степень анизотропии скорости плавления материала. Следовательно, плавление дефектного приповерхностного слоя кремния должно приводить к образованию областей жидкой фазы в форме, близкой к окружности (что и наблю-

дается на образцах, легированных сурьмой). Гексагональная форма фигур плавления на пластинах, имплантированных ионами бора, свидетельствует о меньшей дефектности приповерхностного слоя, что обусловлено значительно меньшей массой ионов бора по сравнению с ионами сурьмы.

По-видимому, определенное влияние на характер формирования ОЛП ионно-имплантированных слоев оказывают напряжения, возникающие вследствие разницы в атомных радиусах кремния и примеси. Об этом свидетельствуют результаты экспериментов с образцами, имплантированными ионами мышьяка. Атомные радиусы бора, мышьяка, сурьмы и кремния соответственно равны 0.91, 1.48, 1.61, 1.34 Å [8]. Наиболее близкие атомные радиусы в этом ряду имеют Si и As. Исходя из этого можно объяснить изменение формы фигур плавления в результате предварительного отжига лишь на образцах, легированных мышьяком. Вследствие близости атомных радиусов Si и As отжиг радиационных дефектов происходит более



Области локального плавления на поверхности исходных (а), имплантированных бором (б) и мышьяком (в, г) образцов кремния (г — после изотермического отжига).

эффективно, при этом количество формирующихся структурных дефектов значительно ниже, чем в образцах, легированных сурьмой и бором. Образование неограниченных фигур плавления на поверхности неотожженных имплантированных мышьяком образцов свидетельствует о большей эффективности в данном случае изотермического отжига по сравнению с импульсной обработкой.

В заключение следует отметить высокую структурную чувствительность процесса формирования областей локального плавления в условиях импульсного нагрева полупроводников. Изменение физико-химических свойств приповерхностного слоя ионно-имплантированного кремния фиксируется не только при дозах, превышающих дозу аморфизации (As и Sb), но и при дозах, намного меньших (в ~ 300 раз) дозы аморфизации Si (B). Интересна и другая особенность эффекта локального плавления, связанная с высокой чувствительностью к глубине модифицированного слоя полупроводника. Так, максимальный пробег ионов сурьмы в кремнии при используемых в наших экспериментах значениях энергии не превышает 0.1 мкм, и столь малая толщина нарушенного слоя уже влияет на характер формирования областей жидкой фазы на поверхности кремния. Этот результат во многом является неожиданным и требует проведения дальнейших исследований. При соответствующем теоретическом обосновании эффект локального плавления, по-видимому, может занять место в ряду методов исследования нарушенных слоев полупроводников.

- [1] *Celler G. K., Robinson McD., Trimble L. E., Lishner D. J.* // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 43. N 9. P. 868—870.
- [2] *Heinig K.-H.* // Intern. Conf. on Energy Pulse Modification of Semiconductors and Related Materials. Dresden, 1984. P. 265—279.
- [3] *Вейко В. П., Имас Я. А., Либенсон М. Н.* и др. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1985. Т. 49. № 6. С. 1236—1239.
- [4] *Вергоданов С. П., Герасименко Н. Н., Мясников А. М.* // Поверхность. Физика, химия, механика. 1988. № 5. С. 69—73.
- [5] *Фаттахов Я. В., Хайбуллин И. Б., Баязитов Р. М., Мисурев Е. М.* // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 17. С. 1474—1478.
- [6] *Рэйзи К.* Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М.: Мир, 1984. 475 с.
- [7] *Пилипенко В. А., Попов Ю. П.* // Электрон. пром-сть. 1988. № 5. С. 3—9.
- [8] Таблицы физических величин / Под ред. И. К. Кыкоина. М.: Атомиздат, 1976. 1006 с.

Воронежский
политехнический институт

Поступило в Редакцию
31 декабря 1988 г.

06

Журнал технической физики, т. 59, в. 11, 1989

ПОЛЕВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ВЫСОТЫ БАРЬЕРА ШОТТКИ В КРИСТАЛЛАХ СИЛЛЕНИТОВ

А. И. Грачев

Появление ряда теоретических и экспериментальных работ позволило понять в общих чертах физические процессы, происходящие в кристаллах класса силленитов $\text{Bi}_{12}\text{RO}_{20}$ ($R=\text{Si}, \text{Ge}, \text{Ti}$), при их использовании в пространственно-временных модуляторах света (ПВМС) типа ПРИЗ. Однако детализация этих процессов еще далеко не закончена, что целиком относится к явлению роста тока через запорный контакт, происходящему в режиме записи на ПРИЗ. Поскольку рост тока носит обратимый характер, то его, очевидно, следует связать с зависимостью высоты барьера контакта от электрического поля. Известно [1], что появление указанной зависимости может быть обусловлено следующими причинами: влиянием сил изображения, влиянием промежуточного слоя, полевой или термополевой эмиссией, причем каждый из механизмов характеризуется своей зависимостью тока контакта $J_{\text{к}}$ от напряжений обратного смещения $V_{\text{к}}$. На контакте кристаллов силленитов реализуется барьер типа Шоттки [2, 3], для которого $J_{\text{к}} \sim \exp \beta V_{\text{к}}^n$, где $n=1/4, 1/2$ или 1 соответственно для перечисленных выше механизмов. Таким образом, причину роста $J_{\text{к}}$ можно было бы выяснить, измерив вольт-амперную характеристику (ВАХ) контакта. К сожалению, для кристаллов силленитов ее прямое измерение практически трудноосуществимо, так как последовательно с нелинейным сопротивлением контакта $R_{\text{к}}$ включено объемное сопротивление образца R_{06} , обычно достаточно высокоомное для того, чтобы определять величину тока, протекающего через образец, в широком интервале приложенных напряжений.

Тем не менее в настоящей работе в ряде случаев удалось однозначно ответить на вопрос о виде зависимости $J_{\text{к}}(V_{\text{к}})$ путем обработки данных измерения стационарных ВАХ освещенных образцов.

Исследовались образцы монокристаллов $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$, выращенных методом Чохральского. Часть образцов дополнительно отжигалась в вакууме, что, как известно [4], приводит к росту темновой и фотопроводимости силленитов на 2-3 порядка.

Стационарные ВАХ измерялись в интервале приложенных напряжений $V=2-600$ В при освещении образцов светом галогенной лампы через интерференционный светофильтр ($\lambda=490$ нм). В ряде образцов ВАХ снимались при различных освещенностях, менявшихся в пределах $10^{-4}-10^{-2}$ Вт/см².

Наиболее сложным моментом при снятии ВАХ в данных кристаллах является вопрос об их стационарности, поскольку процесс установления стационарного тока в них носит долговременный характер, достигая в условиях малой освещенности несколько часов. В [2] было показано, что на конечном этапе установления тока в силленитах наблюдается экспоненциальная зависимость с постоянной времени τ_0 , зависящей от интенсивности падающего света.