

- [10] Fuchs W., Mell H., Thomas P. — Ann. Phys., 1985, 7 Folge, Bd 42, S. 187—197.
 [11] Adler D. — J. de Phys., 1981, v. 42, N C4, p. 3—6.
 [12] Stutzmann M., Jackson W. B., Tsai C. C. — Phys. Rev. B, 1985, v. 32, p. 23—46.

Московский
 государственный университет
 им. М. В. Ломоносова

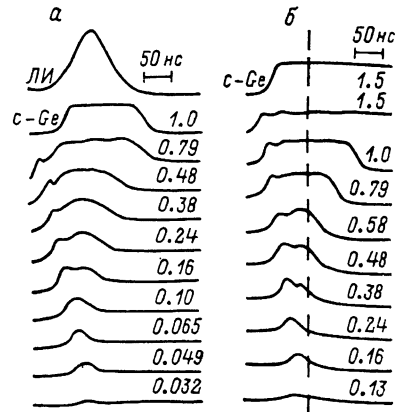
Получено 15.07.1987
 Принято к печати 25.11.1987

ФТП, том 22, вып. 5, 1988

ДИНАМИКА НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ОТЖИГА АМОРФНЫХ И УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ИМПЛАНТАЦИОННЫХ СЛОЕВ ГЕРМАНИЯ

Закиров Г. Г., Ивлев Г. Д., Хайбуллин И. Б.

Как известно [1, 2], имплантационный слой германия может быть аморфным (АИС) и ультрадисперсным (УДИС). АИС образуется независимо от типа внедряемой примеси при достижении соответствующей дозы имплантации. УДИС получается из АИС в процессе имплантации ионов тяжелых химически активных элементов. При переходе приповерхностной области в ультрадисперсное состояние она «распухает», ее плотность и параметр кристаллической решетки уменьшаются примерно в 5 раз и на 10—15 % соответственно. Уменьшается также до ~1—5 % коэффициент отражения от УДИС излучения видимой, УФ и ИК областей спектра. УДИС состоит из множества мелких гранул размерами от десятков до сотен ангстрем и обладает высокой термической стабильностью, вследствие чего восстановить монокристаллическое состояние германия обычной (равновесной) термообработкой не удастся. Это достигается импульсным лазерным отжигом [3]. Установлено, что при незначительном превышении плотности энергии W моноимпульсного облучения над пороговым значением УДИС трансформируется в мелкозернистый поликристалл, при более высоких W либо



Оциллограммы временной зависимости отражения зондирующего излучения от c-Ge, УДИС (а) и АИС (б).

Штриховой линией обозначено положение вершины лазерного импульса (ЛП), числа означают величину плотности энергии лазерного излучения в Дж/см².

образуется крупнозернистая структура, либо воздействие лазерного импульса приводит к восстановлению монокристаллического состояния полупроводника. Причем при определенных режимах лазерного воздействия фиксируются некоторые метастабильные фазы германия [4].

В данной работе с целью дальнейшего изучения стадий и механизма фазовых превращений в германии, инициируемых ионными и лазерными пучками, исследована динамика отжига АИС и УДИС под действием одиночных наносекундных импульсов рубинового лазера.

Для получения УДИС химико-механически полированные пластины (111) монокристаллического германия марки ГДГ-45 имплантировались ионами Sn⁺⁺ (60 кэВ; $1.24 \cdot 10^{16}$ см⁻²). Аморфизация электрохимически полированного Ge ГДГ-10 производилась имплантацией P⁺ с энергией 40 кэВ при дозе 10^{16} см⁻². Плотность ионного тока в обоих случаях была ~1 мкА/см². Динамика лазерного отжига исследовалась по методике [5] оптическим зондированием образца на отражение ($\lambda=1.06$ мкм) с разрешением во времени. Рубиновый лазер гене-

рировал импульсы длительностью 70 нс по полувысоте, величина W составляла $0.02 \div 2.5$ Дж/см².

Из полученных осциллограмм следует (см. рисунок), что отражательная способность R имплантированных образцов начинает заметно изменяться при повышении величины W до ~ 0.03 (УДИС) и ~ 0.13 Дж/см² (АИС). Дальнейшее увеличение W приводит к значительным изменениям R , время нестационарности отражения возрастает. Вместе с тем появляется промежуточный минимум R , после которого (при более высоких значениях W) коэффициент отражения достигает своего максимального квазистационарного значения R_{\max} , примерно одинакового для обоих типов имплантационных слоев. Отражательная способность неимплантированного германия (*c*-Ge), которая начинала меняться при повышении W до ~ 0.4 Дж/см², не испытывает подобной немонотонности возрастания до R_{\max} . Кроме того, ее конечное значение совпадает с исходным, тогда как при достаточном превышении W над порогом конечная величина R у имплантированных образцов оказывается либо выше (для УДИС), либо ниже (для АИС) исходного значения. Облучение УДИС $W > 1.3$ Дж/см² приводило к разрушению поверхности германия, которая становилась матовой.

Наблюдаемое возрастание отражательной способности у *c*-Ge, несомненно, связано с образованием расплавленного слоя, а последующее уменьшение R до исходного значения — с завершением жидкофазной эпитаксии. Хотя восстановление монокристаллической структуры германия при облучении АИС или УДИС происходит тем же путем (т. е. через механизм жидкофазной эпитаксии), процесс лазерного отжига этих слоев не адекватен простой последовательности фазовых переходов плавление—кристаллизация. На это в том или другом случае указывает специфическая временная структура оптического отражения, происхождение которой связано с исходным структурным состоянием полупроводника.

Аморфизация германия приводит к пятикратному [6] возрастанию α на длине волны излучения рубинового лазера и к уменьшению теплопроводности более чем на порядок, если судить об этом по аналогии с кремнием [7]. В основном этими факторами обусловлено существенное снижение порога плавления АИС (~ 0.1 Дж/см²) по сравнению с *c*-Ge (~ 0.4 Дж/см²). Кроме того, аморфизованный германий, как и кремний [8], должен плавиться при температуре, меньшей равновесной точки фазового перехода кристалл—расплав. Последнее приводит к тому, что в процессе нагрева АИС ($W \approx 0.2$ Дж/см²) образуется переохлажденный расплав, из которого формируется затем мелкозернистый поликристалл. Эти процессы сопровождаются кратковременным повышением R (см. рисунок, б) при $W \leq 0.38$ Дж/см². При более высоких значениях $W \geq 0.48$ Дж/см² образующийся мелкозернистый поликристалл также плавится и обуславливает повышение R до квазистационарного значения, соответствующего коэффициенту отражения равновесного расплава Ge. Что касается возникновения промежуточного минимума R , то его можно объяснить существованием стадии быстрой кристаллизации переохлажденного расплава.

*Для иницирования фазовых превращений в УДИС по сравнению с АИС требуется значительно меньшая энергия облучения, в частности, из-за весьма низкой отражательной способности. Судя по тому, что и здесь временная зависимость отражения ($W > 0.1$ Дж/см²) проходит через минимум, возможность образования промежуточного твердофазного состояния также реализуется, но со своими особенностями, связанными с качественно иной структурой УДИС. Основную часть объема УДИС составляют поры, ограниченные контактирующими между собой гранулами. Плавление отдельных гранул, происходящее при пониженной температуре [9], и слияние возникающих микрокапель приводят к образованию слоя переохлажденного расплава, в котором может развиваться полицентровая кристаллизация, промежуточная в процессе лазерного отжига. Следует отметить, что переход германия из ультрадисперсного состояния в расплавленное требует значительного массопереноса, поскольку плотность УДИС в несколько раз меньше плотности жидкой фазы. Здесь имеется в виду то обстоятельство, что увеличение объема жидкой фазы, локально зарождающейся на (и вблизи) поверхности УДИС, возможно лишь с одновременным быстрым перемещением ее в направлении к монокристаллической основе полупроводника.

Таким образом, при наносекундном импульсном отжиге имплантационных слоев германия, как и в процессе отжига аморфизированного кремния [10], возможны промежуточные фазовые превращения, обусловленные начальным переходом полупроводника в метастабильное жидкое состояние.

Л и т е р а т у р а

- [1] Закиров Г. Г., Хайбуллин И. Б., Зарипов М. М. — М.: ВИНТИ АН СССР, № 3449-81, 1981. 26 с.
- [2] Закиров Г. Г., Хайбуллин И. Б., Зарипов М. М. — ФТП, 1983, т. 17, в. 2, с. 232—234.
- [3] Закиров Г. Г., Хайбуллин И. Б., Штырков Е. И. — ФТП, 1985, т. 19, в. 1, с. 33—37.
- [4] Закиров Г. Г., Хайбуллин И. Б. — В кн.: Тез. докл. VII Всес. конф. по процессам роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и пленок. Новосибирск, 1986, с. 163—164.
- [5] Ивлев Г. Д. — Письма ЖТФ, 1982, т. 8, в. 8, с. 468—472.
- [6] Donovan T. M., Spicer W. E., Bennet J. M., Ashlei E. J. — Phys. Rev., 1970, v. 2, N 2, p. 397—413.
- [7] Weber H. C., Cullis A. C., Chew U. G. — Appl. Phys. Lett., 1983, v. 43, N 7, p. 669—671.
- [8] Bagley B. G., Chen H. S. — In: Laser-Solid Interaction a. Laser Processing. N. Y., 1979, p. 97—101.
- [9] Петров Ю. И. Физика малых частиц. М., 1982. 359 с.
- [10] Ивлев Г. Д., Малевич В. Л. — В кн.: Тез. докл. VII Всес. конф. по процессам роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и пленок. Новосибирск, 1986, с. 203—204.

Казанский

физико-технический институт КФ АН СССР

Получено 14.10.1987

Принято к печати 25.11.1987

ФТП, том 22, вып. 5, 1988

К ВОПРОСУ ОБ ЭФФЕКТЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКА В НЕОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Пожела Ю. К., Сталерайтис К. К.

В [1] были показаны возможности применения эффекта изменения концентрации носителей заряда в полупроводнике, возникающего исключительно из-за неоднородности внешнего магнитного поля [2], для создания датчика градиента магнитного поля. Являясь резистивным датчиком, сопротивление которого зависит от неоднородности магнитного поля и в определенных пределах практически не зависит от индукции магнитного поля B , такой датчик может обеспечить более высокую точность измерения неоднородности поля по сравнению с датчиками дифференциального типа [3].

В [1, 2] проведен упрощенный расчет эффекта, учитывающий одну из пары ортогональных составляющих тензора неоднородности магнитного поля, удовлетворяющих соотношению $\text{rot } \mathbf{B} = 0$. Такой расчет, как будет показано далее, в определенных условиях действительно оправдывается (эти условия близки к имевшимся в эксперименте [2]). Однако интерпретация эффекта в этих условиях, а тем более закономерности и их интерпретация в случае более широкого диапазона параметров исследуемых образцов остаются неясными, так как обе составляющие тензора неоднородности поля являются равными и нельзя заранее пренебречь какой-либо из них.

Далее проведен расчет перераспределения концентрации свободных электронно-дырочных пар в прямоугольной полупроводниковой пластине в слабом неоднородном магнитном поле с учетом обеих составляющих тензора неоднородности магнитного поля, выполнен анализ поведения средней концентрации носителей заряда и описаны экспериментальные результаты измерения электропроводности образцов германия с различными поперечными размерами и условиями поверхностной рекомбинации.