

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

06;12

Журнал технической физики, т. 63, в. 2, 1993

© 1993 г.

**ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕРМОВОЛНОВЫХ СИГНАЛОВ
ОТ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ
В ГЕОМЕТРИИ ЭФФЕКТА “МИРАЖА”***А.Л.Глазов, К.Л.Муратиков, А.В.Суворов*

В последнее время серьезное внимание уделяется исследованию возможностей использования термоволновых методик для диагностики процессов ионной имплантации в полупроводниковые структуры и материалы [1-10]. Большим достоинством подобного рода методик по сравнению с традиционно используемыми для этих целей (обратное резерфордское рассеяние, бриллюэновская спектроскопия) является более высокая чувствительность. Вместе с тем для термоволновых методик характерны высокое пространственное разрешение и полное отсутствие вредного воздействия на материал.

К настоящему времени для целей диагностики процессов ионной имплантации продемонстрирована эффективность использования фотоакустического метода с возбуждением в полупроводниках температурных волн лазерным излучением с длиной волны $\lambda = 1.06$ мкм [1], методик, основанных на тепловой модуляции коэффициента поверхностного отражения [2-3,5], а также на эффектах деформации поверхности полупроводника, возникающей в них при возбуждении температурных волн в результате действия термоупругой деформации [7-9]. Кроме того, в работах [5,6] методами фотодефлекционной спектроскопии установлено сильное изменение характера внутризонного поглощения в полупроводниках под действием ионной имплантации.

В данной работе исследовалась возможность диагностики процессов ионной имплантации методами фотодефлекционной микроскопии с использованием в качестве возбуждающего источника YAG: Nd твердотельных лазеров с длиной волны излучения $\lambda = 1.06$ мкм. Для обеспечения более высокой чувствительности и акустической помехозащищенности при изучении объектов термоволновыми методами в геометрии эффекта “миража” нами использовался интерферометрический способ регистрации сигнала [11,12]. При этом в отличие от предыдущих работ, в которых главным образом исследовалось влияние ионной имплантации на термо-

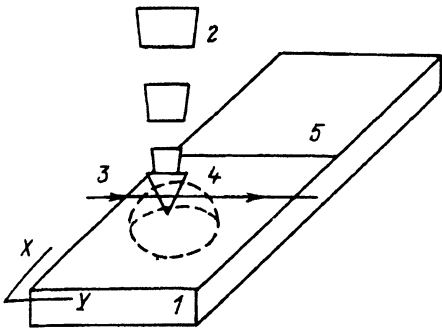


Рис. 1. Схема получения термоволновых изображений твердотельных объектов. 1 — образец, 2 — возбуждающее лазерное излучение, 3 — считывающий лазерный луч, 4 — нестационарная тепловая линза, 5 — граница раздела облучения и необлученных участков образца.

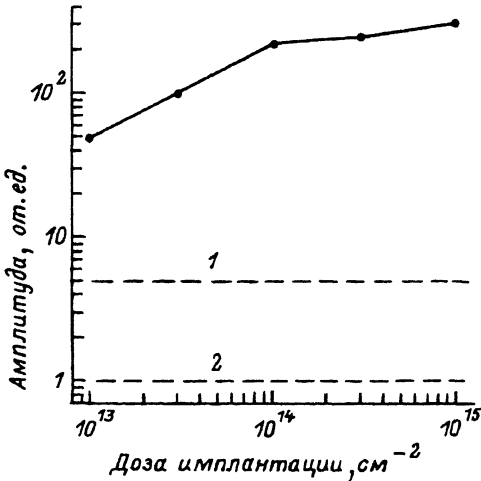


Рис. 2. Зависимость термоволнового сигнала от дозы имплантации InP ионами Mg⁺ 1 — сигнал от неимплантированного образца, 2 — уровень шумов в измерительной системе.

волновые сигналы от Si и GaAs, в данной работе приведены соответствующие результаты и для ионноимплантированного InP.

Для наглядности сравнения термоволновых сигналов от имплантированного и неимплантированного полупроводника при изготовлении образцов одна из его частей не подвергалась воздействию ионов. Диапазон доз имплантации образцов варьировался в широких пределах. Возбуждение температурных волн в полупроводнике осуществлялось периодически модулированным во времени излучением лазера ЛТИ-701, обеспечивавшим мощность светового потока на поверхности образца около 100 мВт. Размер светового пятна на его поверхности составлял 30–40 мкм. Частота модуляции возбуждающего излучения в процессе экспериментов изменялась от 125 Гц до 10 кГц.

Считывание сигнала, возникающего в результате образования вблизи поверхности образца нестационарной тепловой линзы в месте воздействия возбуждающего лазерного излучения, осуществлялось с помощью He-Ne лазера ЛГ 52-1 с мощностью 8 мВт. Общая схема расположения образца, возбуждающего и считывающего лазерные пучки, показана на рис. 1. Отметим, что для всех экспериментов радиус пучка считывающего лазера в зоне действия тепловой линзы составлял примерно 15 мкм, а расстояние от его центра до поверхности образца находилось в пределах 40–50 мкм.

Эксперименты производились на пластинках полупроводников толщиной 500 мкм с полированными с обеих сторон поверхностями. Изображение образца формировалось путем его механического сканирования. На рис. 2 представлены типичные результаты, полученные для амплитудной и фазовой составляющих термоволновых сигналов на образцах из InP, имплантированных ионами Mg⁺ с энергией 90 кэВ. Из приведенных данных видно, что ионная имплантация приводит к значительному

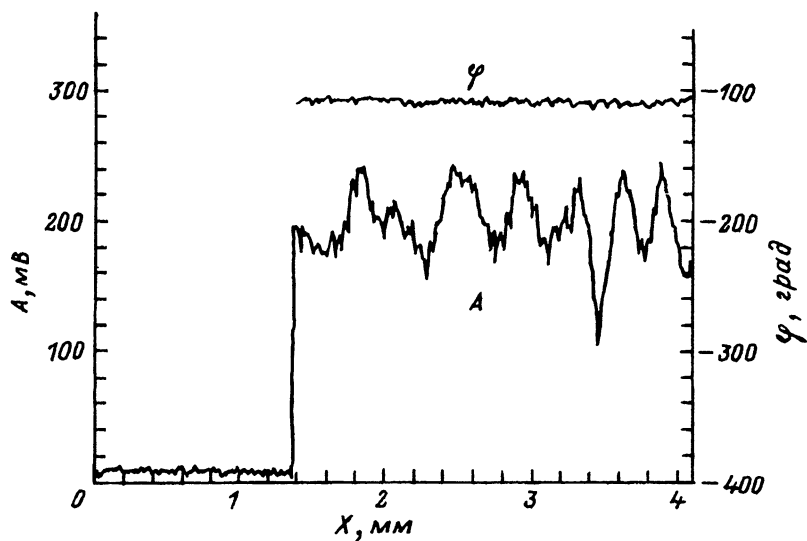


Рис. 3. Амплитудная (A) и фазовая (φ) составляющие термоволнового сигнала от образца из InP с полированной обратной поверхностью.

Доза облучения ионами Mg^+ составляла $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ (область $X > 1.4 \text{ мм}$), энергия ионов 90 кэВ, частота модуляции 1 кГц.

увеличению термоволнового сигнала. При этом основной причиной увеличения сигнала от имплантированного участка образца является рост поглощения излучения возбуждающего лазера в приповерхностном слое.

Для определения характера изменения термоволнового сигнала при ионной имплантации для InP была снята зависимость его амплитуды от дозы. Результаты подобного рода экспериментов приведены на рис. 3. При дозах имплантации больше 10^{14} см^{-2} рост сигнала с дозой имплантации уменьшается, что характерно для начала процессов аморфизации приповерхностных слоев полупроводникового материала. При малых уровнях имплантации зависимость амплитуды термоволнового сигнала от дозы близка к линейной. В соответствии с реально имеющимся уровнем шумов в системе минимально регистрируемая доза имплантации в InP ионов Mg^+ составляла около 10^{11} см^{-2} . Отметим, что это значение близко к минимально регистрируемой дозе, полученной термоволновыми методами для полупроводниковых материалов Si и GaAs [1-10].

При получении изображений ионноимплантированных образцов с обими полированными поверхностями при всех дозах имплантации наблюдались осцилляционные особенности в поведении амплитудной составляющей термоволнового сигнала. Их характерный период изменялся от образца к образцу и при изменении направления сканирования, но амплитуда колебаний обычно имела достаточно большое значение и составляла 20-40% от величины сигнала во всем использованном диапазоне частот модуляции возбуждающего излучения. Отметим, что подобного рода особенности в поведении термоволновых сигналов от полупроводниковых образцов впервые наблюдались в работе [1] при использовании для получения их изображений газомикрофонных камер, но остались тогда неидентифицированными.

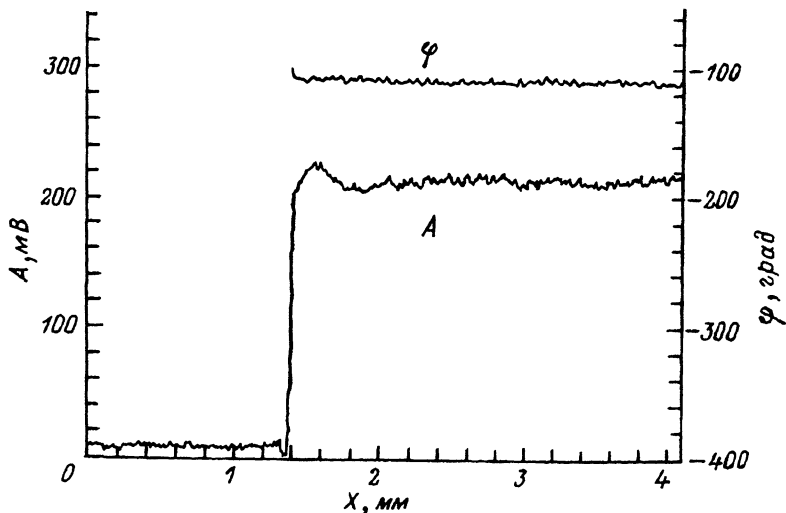


Рис. 4. Амплитудная и фазовая составляющие термоволнового сигнала от образца из InP с неполированной обратной поверхностью.

Все данные те же, что и на рис. 3.

Для выяснения природы отмеченных особенностей в поведении термоволновых сигналов были проведены эксперименты на образцах со шлифованной нижней гранью. Один из примеров изменения термоволнового сигнала при сканировании подобного рода образцов показан на рис. 4. Из него видно, что осцилляционные особенности в поведении амплитуды термоволнового сигнала полностью отсутствуют. Вместе с тем характер изменения фазовой составляющей термоволнового сигнала от имплантированных участков образцов с полированной и шлифованной нижней гранью оставался практически неизменным (для неимплантированных участков InP фаза сигнала не измерялась из-за малой его величины).

Результаты выполненных экспериментов приводят к выводу о том, что возникновение осцилляций термоволновых сигналов связано с интерференцией возбуждающего лазерного излучения, прошедшего в образец и зеркально отраженного от его задней поверхности. При этом благодаря частичному отражению излучения возбуждающего лазера от задней поверхности образца в нем образуется стоячая световая волна. При сканировании вдоль образца из-за неоднородности толщины пластинки ее верхняя поверхность последовательно попадает либо в пучность, либо в узел стоячей световой волны. В результате в процессе сканирования происходит периодическое изменение световой энергии, поглощаемой на поверхности образца, хотя среднее значение световой энергии, поглощаемой в объеме полупроводника, при этом остается неизменным.

В связи с этим на фоне относительно однородного вклада от объема полупроводника появляется осциллирующая добавка, связанная с чисто поверхностным поглощением. Отметим, что по периоду осцилляций может быть определена степень непараллельности граней образца. Типичное значение угла расходимости между гранями для исследованных образцов составляло 10^{-3} рад. Из поведения фазовой составляющей термоволнового сигнала следует, что от имплантированных участ-

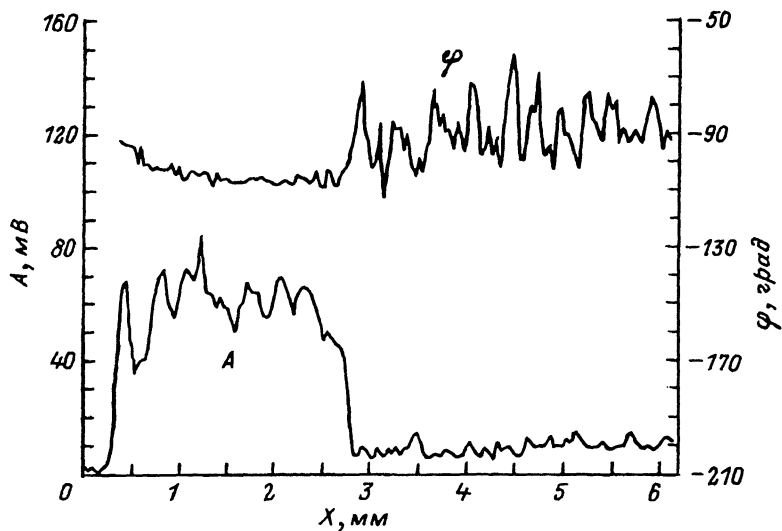


Рис. 5. Амплитудная и фазовая составляющие термоволнового сигнала от образца из GaAs с полированной обратной поверхностью.

Доза облучения ионами Sb^+ составляла 10^{14} см^{-2} (область $X < 3 \text{ мм}$), энергия ионов 30 кэВ, частота модуляции 1 кГц.

ков образцов из InP он образуется главным образом за счет поверхностного поглощения световой энергии возбуждающего излучения, а вклад от объемного поглощения пренебрежимо мал.

Далее рассмотрим вопрос о возможности использования описанной методики для диагностики процессов ионной имплантации в другие полупроводниковые материалы. Остановимся сначала на случае материала GaAs. На рис. 5 показан характер изменения амплитудной и фазовой составляющих термоволнового сигнала при сканировании образца из GaAs с обеими полированными поверхностями, имплантированного ионами Sb^+ с энергией 30 кэВ. Из него видно, что имплантация ионов в GaAs приводит к сильному изменению амплитуды термоволнового сигнала. При этом в термоволновом сигнале от GaAs также присутствуют характерные осцилляции, проявляющиеся наиболее сильно для имплантированных областей в поведении амплитудной составляющей, а для неимплантированных в фазовой.

Подобного рода поведение термоволнового сигнала от образцов GaAs в целом объясняется теми же причинами, что и для InP. Следует только отметить, что для GaAs из-за более сильного поглощения возбуждающего излучения в неимплантированных областях полупроводника имеется возможность проследить для этих областей и за поведением фазовой составляющей. В частности, из рис. 5 видно, что в фазе термоволнового сигнала также присутствуют характерные осцилляции. Их наличие связано с различием фаз сигналов, обусловленных поглощением энергии возбуждающего излучения на поверхности и в объеме образца [13]. Поэтому при сканировании образца с зеркальным отражением излучения возбуждающего лазера от нижней грани при монотонном изменении их толщины и соизмеримых значениях вкладов от поверхностного и объ-

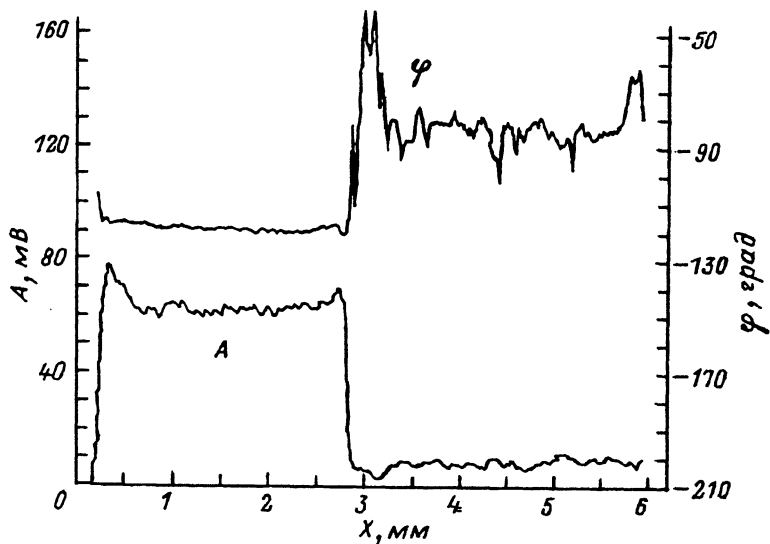


Рис. 6. Амплитудная и фазовая составляющие термоволнового сигнала от образца из GaAs с неполированной обратной поверхностью.
 Все данные те же, что и на рис. 5.

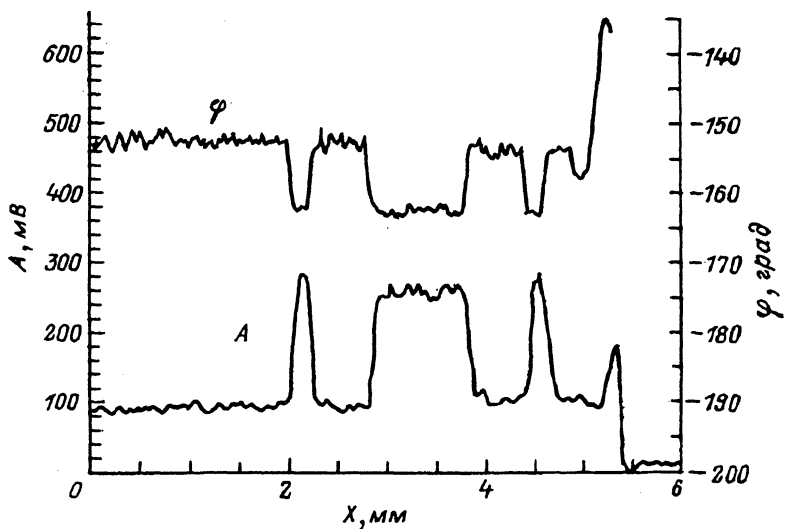


Рис. 7. Амплитудная и фазовая составляющие термоволнового сигнала от образца из Si с неполированной обратной поверхностью.

Доза облучения ионами B^+ составляла 10^{15} см^{-2} (области $2 < X < 2.3$, $2.9 < X < 3.8$ и $4.3 < X < 4.6$ мм), частота модуляции 1 кГц.

емного поглощения должны иметь место осцилляционные особенности в поведении фазы.

В имплантированной области значение фазы термоволнового сигнала изменяется слабо и соответствует практически случаю поверхностного поглощения возбуждающего излучения. Отметим, что аналогично слу-

чаю полупроводниковых образцов из InP шлифовка нижней поверхности образца приводила к полному исчезновению осцилляционных особенностей как в амплитуде, так и в фазе термоволнового сигнала. На рис. 6 приведены результаты сканирования образца из GaAs, использовавшегося в предыдущем эксперименте, после шлифовки нижней грани.

Наряду с рассмотренными полупроводниковыми материалами данная термоволновая методика может быть применена и для диагностики процессов ионной имплантации в кремний. Для исследования этого вопроса в работе анализировались особенности поведения термоволновых сигналов от образцов Si, имплантированных ионами В⁺ с энергией 90 кэВ. На рис. 7 представлено поведение термоволнового сигнала при сканировании кремниевого образца со шлифованной нижней гранью. Из сравнения полученных результатов с уровнем шумов в системе следует, что данным методом может быть зарегистрирована доза имплантации ионов В⁺ в Si порядка 10^{11} см⁻².

Таким образом, выполненные исследования показывают, что интерферометрическая методика регистрации термоволновых сигналов в геометрии эффекта "миража" может быть использована для диагностики процессов ионной имплантации в различные полупроводники. При этом возбуждение температурных волн с помощью когерентного излучения, слабо поглощаемого образцом, может приводить при его сканировании к появлению в амплитудной составляющей термоволновых сигналов характерных осцилляционных особенностей в имплантированных областях полупроводников и фазовой составляющей в неимплантированных областях.

Список литературы

- [1] *McFarlane R.A., Hess L.D.* // Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 36. N 2. P. 137-139.
- [2] *Smith W.L., Rosencwaig A., Willenborg D.L.* // Appl. Phys. Lett. 1985. Vol. 47. N 7. P. 584-586.
- [3] *Rosencwaig A.* // Photoacoustic and Thermal Wave Phenomena in Semiconductors / Ed. by A. Mandelis. New York; Amsterdam; London: North-Holland, 1987. P. 97-135.
- [4] *Зенкевич А.В., Неволин В.Н., Петровский А.Н., Сальник А.О.* // Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 6. С. 1274-1278.
- [5] *Marinelli M., Zammit U., Pizzoferrato R. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 55. N 26. P. 2745-2747.
- [6] *Zammit U., Gasparrini F., Marinelli M. et al.* // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 69. N 4. P. 2577-2580.
- [7] *Christofides C., Vitkin I.A., Mandelis A.* // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 67. N 6. P. 2815-2821.
- [8] *Hara T., Hagiwara H., Ichikawa R. et al.* // IEEE Electr. Dev. Lett. 1990. Vol. 11. N 11. P. 485-486.
- [9] *Washidzu G., Hara T., Ichikawa R. et al.* // Jap. J. Appl. Phys. 1991. Vol. 30. N 6A. P. L1025-L1027.
- [10] *Matsumori T., Ushida M., Izumi T., Uehara F.* // Digest of 7th Intern. Topical Meeting on Photoacoustic and Photothermal Phenomena. Doorwerth (the Netherlands), 1991. P. 473-474.
- [11] *Glasov A.L., Muratkov K.L.* // Int. J. Optoelectron. 1989. Vol. 4. N 3. P. 589-597.
- [12] *Walther H.G., Friedrich K., Haupt K. et al.* // Appl. Phys. Lett. 1990. Vol. 57. N 16. P. 1600-1601.
- [13] *Helander P., Lundstrom I.* // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. N 9. P. 5069-5075.

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
27 февраля 1992 г.