

корированием дислокаций. В зависимости от характера дислокационных включений они могут декорироваться, а могут не декорироваться магнием.

При этом нельзя исключить проникновения магния в глубь образца по дислокациям, причем именно по тем, которые имеют выход в легированную ионами приповерхностную область. Тогда дислокационные включения, не имевшие выхода на поверхность, должны оставаться свободными от магния, что и наблюдается в эксперименте.

Вблизи поверхности примесные профили, полученные в результате отжига в интервале температур 400—500 °С, характеризуются стягиванием примеси из района R_p — среднего проецированного пробега ионов к поверхности — с образованием плато и поверхностного максимума. По-видимому, это связано с декорированием магнием структурных дефектов в приповерхностной области и в области максимальных потерь энергии внедряемых ионов на ядерные столкновения. Связываясь в этих областях в примесно-дефектные комплексы, магний уходит из диффузионного потока, что и приводит к эффекту «восходящей» диффузии. Стягивание магния к поверхности наблюдалось и при импульсном отжиге легированных ионами образцов InAs [4].

Таким образом, оказывается, что магний в InAs при постимплантационном отжиге скапливается в областях, содержащих структурные нарушения (дислокации, радиационные дефекты, поверхность). Вполне возможно, что в этих областях он связывается в примесно-дефектные комплексы и не проявляет акцепторных свойств. По-видимому, это обстоятельство наряду с донорными свойствами радиационных дефектов в InAs [2] определяет трудности для применения легирования арсенида индия ионами магния для создания p -областей.

В заключение авторы выражают благодарность Г. А. Качурину за обсуждение результатов, В. А. Гадкову, Н. А. Валишевой, В. Г. Серяпину и Г. С. Хрящеву за помощь при проведении работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] E. Schillmann. Naturforsch., 11a, 472 (1956).
- [2] И. П. Акимченко, Е. Г. Паншина, О. В. Тихонова, Е. А. Фример. ФТП, 13, 2210 (1979).
- [3] X. Риссел, И. Руге. Ионная имплантация, 360., М. (1983).
- [4] S. J. Pearton, A. R. von Neida, J. M. Brown, K. T. Short, L. J. Oster. J. Appl. Phys., 64, 629 (1988).

Редактор В. В. Чалдышев

ФТП, том 26, вып. 9, 1992

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ФОТОАКУСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В СТЕКЛООБРАЗНОМ СЕЛЕНИДЕ МЫШЬЯКА

В. В. Рыков, А. В. Харионовский, О. Ф. Вывенко

Политехнический институт, 610023, Вятка, Россия
(Получено 22.02.1991. Принято к печати 2.04.1992)

Фотоакустические (ФА) методы исследования вызывают определенный интерес для изучения разнообразных характеристик (оптических, тепловых, электронных) полупроводников [1–4]. Соответственно развиваются и физические исследования самого фотоакустического эффекта, лежащего в основе этих групп методов [5–9]. Для измерения фотоакустического отклика в основном использу-

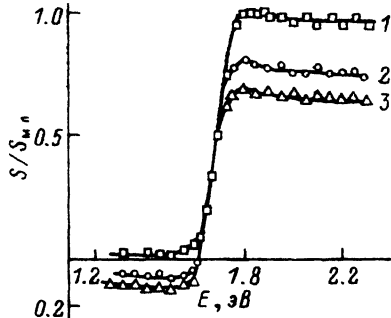


Рис. 1. Влияние поверхностной обработки на спектральную зависимость фотоакустического сигнала стеклообразного селенида мышьяка. 1 — травление шлифованной поверхности в 5*N* растворе NaOH (0.5 мин); 2 — шлифованная поверхность; 3 — обработка шлифованной поверхности в концентрированной азотной кислоте (1 мин).

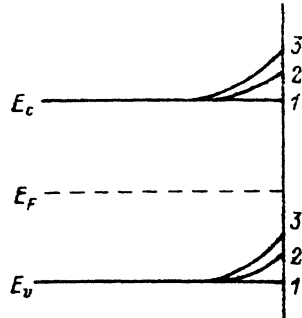


Рис. 2. Диаграмма энергетических зон приповерхностной области стеклообразного селенида мышьяка при различной обработке его поверхности. 1 — полирующее травление в 5*N* растворе NaOH; 2 — механическая шлифовка; 3 — обработка в концентрированной азотной кислоте.

ются методы газомикрофонной спектроскопии [10, 11]. Параллельно с ними развиваются методы регистрации фотоакустического сигнала, основанные на применении пьезодатчика [4, 12–15]. К настоящему времени при помощи пьезоэлектрических схем регистрации в спектральных зависимостях фотоакустического сигнала на ряде материалов наряду с обычным тепловым расширением поверхности полупроводника при диссипации в нем световой энергии наблюдались отрицательные значения фотоакустического отклика [4, 13, 15, 16].

В данной работе исследуется отрицательный фотоакустический (ОФА) эффект в стеклообразном селениде мышьяка. Измерения ФА сигнала проведены известным методом, который основан на регистрации переменных изгибов образца, соединенного с консольно закрепленным пьезоэлементом. Образец размерами $5 \times 5 \times 1$ мм приклеивался плицинном к резонатору в виде тонкой пластинки из плавленного кварца, посредством которого механические напряжения в образце передаются на пьезоэлемент. Изгибы возникают вследствие упругих деформаций приповерхностной области образца при освещении его импульсным светом с частотой модуляции, равной резонансной частоте механической системы (1 ÷ 2 кГц). Фаза колебаний образца сравнивалась с фазой колебаний зачерненной металлической пластинки, закрепленной вблизи исследуемого образца, при ее освещении. За положительные значения амплитуды ФА отклика принимались изгибы образца, совпадающие с изгибом эталонной зачерненной пластинки металла. Сдвиг фазы измеряемого сигнала относительно опорного на 180° изображен на графике как отрицательный ФА сигнал. Для пересчета спектров по интенсивности строилась зависимости $S/S_{m,p}$, где S — ФА спектр образца, $S_{m,p}$ — ФА спектр зачерненной металлической пластинки. Более подробно установка описана ранее [14, 15].

На исследованных поверхностях измерялась фотопроводимость, и по выпрямлению в точечном контакте контролировалось соотношение между *n*- и *p*-компонентами поверхностной проводимости, методика измерения которых описана в [17].

Изменение знака фотоакустического сигнала (отрицательный фотоакустический эффект) в стеклообразных селене [16] и сульфиде мышьяка [15] наблюдается на поверхностях, подвергнутых механической шлифовке. На шлифованных поверхностях селенида мышьяка в области слабого поглощения также регистрируется отрицательный ФА эффект (рис. 1, кривая 2), величина которого существенным образом зависит от обработки поверхности. При этом

химической обработке подвергалась только исследуемая поверхность. Травление поверхности в окислительной среде HNO_3 увеличивает отрицательный ФА отклик, вызывая одновременное снижение амплитуды сигнала в области собственного поглощения полупроводника (рис. 1, кривая 3). Последующая обработка в $4 + 5 N$ растворе NaOH приводит к противоположному изменению спектральной зависимости ФА отклика (рис. 1, кривая 1). При этом наблюдаются изменения в соотношении между n - и p -компонентами поверхностной проводимости и в спектральной зависимости фотопроводимости. Соотношение электронной σ_n и дырочной σ_p проводимости селенида мышьяка при указанных выше способах обработки поверхности составляет $\sigma_p/\sigma_n = 1.3$ после полировки $5 N$ раствором NaOH , $\sigma_p/\sigma_n = 1.8 + 2.0$ при шлифовке и $\sigma_p/\sigma_n = 2.5 + 3.0$ после травления в концентрированной азотной кислоте.

Фотопроводимость приповерхностного слоя стеклообразного селенида мышьяка также изменяется при изменении состояния поверхности, уменьшаясь с увеличением изгиба зон.

Указанные способы обработки поверхности селенида мышьяка существенным образом влияют на зарядовое состояние поверхности и, следовательно, изменяют приповерхностный изгиб зон. Наибольшее увеличение изгиба зон происходит после травления в окислительной среде, при этом, как было показано авторами [18], поверхность селенида мышьяка заряжается отрицательно. Идеализированная энергетическая зонная диаграмма поверхности для различных способов обработки приведена на рис. 2.

Увеличение амплитуды ОФА отклика в более сильном приповерхностном электрическом поле можно объяснить тем, что стеклообразный As_2Se_3 представляет собой частично компенсированный полупроводник с большой концентрацией заряженных локальных дефектов [19], а кулоновское взаимодействие между заряженными дефектами, находящимися в электрическом поле, приводит к появлению механических напряжений в приповерхностном слое. При появлении неравновесных носителей заряда при освещении уменьшается напряженность электрического поля вблизи поверхности, снимаются механические напряжения и регистрируется ФА сигнал сжатия. Аналогичные процессы, происходящие в собственной полосе поглощения, вычитаются из ФА сигнала, обусловленного обычным тепловым расширением, что вызывает пропорциональное снижение ФА отклика в собственной полосе поглощения полупроводника. Величину механических напряжений, направленных вдоль исследуемой поверхности селенида мышьяка, можно определить, если считать, что заряженные дефекты концентрацией 10^{24} м^{-3} [19] находятся в приповерхностном электрическом поле напряженностью 10^4 В/м . При интенсивности светового потока 0.1 мВт/см^2 на частоте 1 кГц , приняв значения модуля Юнга $1.5 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ и коэффициента Пуассона 0.29 , получаем величину механических напряжений, изменяемых освещением 20 Дин/см^2 , что соответствует относительной деформации приповерхностного слоя $0.5 \cdot 10^{-10}$. Полученные значения деформации приповерхностного слоя вследствие изменения кулоновского взаимодействия дефектов с полем приповерхностного барьера сопоставимы с величиной тепловых деформаций приповерхностной области полупроводника при диссипации энергии фотовозбужденных носителей. При тех же значениях интенсивности светового потока, согласно модели Сандомирского—Сабликова [7], при коэффициенте теплового линейного расширения $2 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$ получаем амплитуду колебаний температуры на поверхности полупроводника 10^{-5} град и относительную деформацию приповерхностной области вследствие теплового расширения $2 \cdot 10^{-10}$. Подтверждением вышеизложенного являются релаксации отрицательного ФА эффекта при соответствующих химических обработках поверхности. Последнее объясняется тем, что зарядовое состояние поверхности изменяется не мгновенно и с соответствующей скоростью изменяется амплитуда ФА отклика.

Таким образом, наблюдаемый при заряджении поверхности отрицательный фотоакустический сигнал зависит от изгиба зон в приповерхностной области полупроводника. Чем больше напряженность электрического поля в приповерхностном слое, тем больше амплитуда отрицательного фотоакустического отклика.

Аналогичные процессы наблюдаются в сульфиде мышьяка ^[15] при воздействии внешнего электрического поля либо при изменении концентрации локальных заряженных центров при фотоструктурных превращениях.

Предлагаемый механизм отрицательного фотоакустического эффекта предполагает появление упругих деформаций в приповерхностной области полупроводника при модуляции области пространственного заряда внешним электрическим полем. Об особенностях упругих деформаций халькогенидных стеклообразных полупроводников в электрическом поле будет сообщено дополнительно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] C. S. Sunandana. Phys. St. Sol. (a), 105, 11 (1988).
- [2] S. Yamasaky, H. Okushi, A. Matsuda, H. Oheda, N. Hata, K. Tanaka. Japan. J. Appl. Phys., 20, L665 (1981).
- [3] C. L. Cesar, H. Vargas, J. M. Filha, L. C. M. Miranda. Appl. Phys. Lett., 43, 555 (1983).
- [4] O. Goede, W. Heimbrodtt, Th. Kopp. Phys. St. Sol. (a), 108, 443 (1988).
- [5] I. N. Bandeira, H. Closs, C. C. Chison. J. Photoacoustic, 1, 275 (1982).
- [6] L. C. M. Miranda. Appl. Optics, 21, 2923 (1982).
- [7] В. А. Сабликов, В. Б. Сандомирский. ФТП, 17, 81 (1983).
- [8] А. Н. Васильев, В. А. Сабликов, В. Б. Сандомирский. Изв. вузов. Физика, 30, 119 (1987).
- [9] А. Н. Васильев, В. А. Сабликов. ФТП, 23, 33 (1989).
- [10] K. Inabe, S. Nakamura, N. Takeuchi. J. Phys. Soc. Japan., 53, 1621 (1984).
- [11] Л. А. Балагуров, Н. Ю. Карпова, Э. М. Омеляновский, В. Е. Сизов. ФТП, 23, 673 (1989).
- [12] W. Jackson, N. M. Amer. J. Appl. Phys., 51, 3343 (1980).
- [13] O. Goede, W. Heimbrodtt, F. Sittel. Phys. St. Sol. (a), 93, 277 (1986).
- [14] В. И. Круглов, Л. П. Страхов. ФТТ, 12, 3603 (1970).
- [15] В. И. Круглов, В. В. Рыков, Т. С. Рыкова, А. В. Харионовский. ФТТ, 28, 1547 (1985).
- [16] В. В. Рыков, С. Н. Синцов. ФТТ, 26, 2212 (1984).
- [17] Б. Т. Коломиец, А. С. Кочемировский, Т. Н. Мамонтова, Л. В. Пивоварова, Н. И. Чигринская. Вопросы физики полупроводников, 97. Калининград (1975).
- [18] Б. Т. Коломиец, К. П. Корнев, А. С. Кочемировский, Л. В. Пивоварова, Т. Н. Мамонтова. ЖТФ, 52, 2424 (1982).
- [19] Н. Мотт, Э. Девис. Электронные процессы в некристаллических веществах, 2, 658, М. (1982).

Редактор В. В. Чалдышев

ФТП, том 26, вып. 9, 1992

О ВТОРОМ ДОНОРНОМ УРОВНЕ МЕЖДОУЗЕЛЬНОГО ХРОМА В КРЕМНИИ

Е. С. Демидов, В. В. Карзанов

Нижегородский исследовательский физико-технический институт, Нижний Новгород, Россия
(Получено 22.01.1992. Принято к печати 2.04.1992)

Мнение о том, что хром в кремнии является двойным донором, утверждалось в ряде публикаций ^[1-3]. Авторами работ ^[2, 3] на основе данных эффекта Холла был сделан вывод: второй донорный уровень находится на