

ного рассеяния [14]. Вычисление уровня химического потенциала в исследованных образцах показывает, что во всем интервале температур электронный газ остается невырожденным. Низкие значения концентрации электронов при низких температурах позволяют пренебречь рассеянием на внутренней части потенциала заряженного центра и эффектами интерференции [15]. При расчетах учитывались зависимости эффективных масс и диэлектрической проницаемости от температуры, эллипсоидальность энергетических поверхностей. Значение потенциала сплавного рассеяния взято из работы [16]. Концентрация ионизованных примесей определялась при низких температурах, где рассеяние на фоновых несущественно, и учитывалась ее температурная зависимость.

На рис. 2 приведены расчетные температурные зависимости подвижности электронов при различных механизмах рассеяния. Из условия наилучшего совпадения экспериментальных и расчетных значений подвижности в широком температурном интервале была определена константа деформационного потенциала $E=25$ эВ. Небольшое расхождение теоретически рассчитанных и экспериментальных подвижностей при температурах выше 30 К, вероятно, связано с учетом влияния непараболичности энергетического спектра носителей заряда.

Авторы благодарны Л. Ф. Васильевой за помощь в приготовлении омических контактов к образцам.

Л и т е р а т у р а

- [1] Кайданов В. И., Ревич Ю. В. — УФН, 1985, т. 145, в. 1, с. 51—86.
- [2] Palmethofer L., Cresslehner K. M., Ratschbacher I., Loper-Otero A. — In: Phys. Narrow Gap Semicond. Proc. Linz, Austria, 1981, p. 391—396.
- [3] Chattopdhyay D., Aichman G., Nimtz A. — Sol. St. Commun., 1984, v. 51, N 3, p. 152.
- [4] Тонева А. — Болг. физ. ж., 1981, т. 8, в. 2, с. 152—160.
- [5] Осю М. — Phys. Rev., 1974, v. 10, p. 4274.
- [6] Водопьянов В. Н., Кондратенко М. М. — Изв. вузов СССР, Физика, 1977, № 1, с. 136.
- [7] Горлей П. Н., Шендеровский В. А. — Препринт ИФ АН УССР, № 10. Киев, 1979.
- [8] Горлей П. Н., Заячук Д. М., Старик П. М., Шендеровский В. А. — УФЖ, 1980, т. 25, в. 4, с. 1364—1368.
- [9] Заячук Д. М., Илатовская Г. М., Старик П. М. — ФТП, 1986 т. 20, в. 9, с. 1690—1693.
- [10] Вейс А. Н. — ФТП, 1987, т. 21, в. 2, с. 263—266.
- [11] Сизов Ф. Ф., Орлецкий В. Б., Радченко М. В. — ФТП, 1981, т. 14, в. 21, с. 2117—2122.
- [12] Равич Ю. В., Ефимова Б. А., Смирнова И. А. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe, PbS. М., 1967. 484 с.
- [13] Ehrenreich H. J. — Appl. Phys., 1961, v. 32 (Suppl.), p. 2155.
- [14] Oosaka F., Sugano T., Okabe Y., Okada Y. — Japan. J. Appl. Phys., 1976, v. 15, N 12, p. 2374—2380.
- [15] Zawadzki W. — In: Handbook on Semicond. N. Y.—Oxford, 1982, v. 1, p. 713.
- [16] Батыев Э. Г., Пусеп Ю. А. — В кн.: Тр. Республ. коллоквиума по оптике и спектроскопии полупроводников и диэлектриков. Тбилиси, 1984, с. 182—188.

Институт физики полупроводников
СО АН СССР
Новосибирск

Получено 29.10.1987
Принято к печати 18.03.1988

ФТП, том 22, вып. 8, 1988

ИОННО-ЛУЧЕВОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ АМОРФНОГО КРЕМНИЯ, СОДЕРЖАЩЕГО ИЗОВАЛЕНТНУЮ ПРИМЕСЬ ГЕРМАНИЯ

Хохлов А. Ф., Машин А. И., Ершов А. В., Машин Н. И.,
Игнатьева Е. А.

В опубликованных недавно работах [1-3] приводились экспериментальные данные, свидетельствующие о сильном влиянии изовалентной примеси германия на электрофизические свойства аморфного кремния (*a*-Si). Было обнаружено, что присутствие германия в *a*-Si в концентрациях $\sim 10^{19}$ — 10^{20} см⁻³ при-

водит к тому, что пленки ($a\text{-Si} : \text{Ge}$) проявляют свойства, аналогичные свойствам гидрогенизированного аморфного кремния ($a\text{-Si} : \text{H}$). Полученные результаты объяснялись эффектом снижения плотности локализованных состояний в щели подвижности $a\text{-Si} : \text{Ge}$ за счет перестройки атомного окружения вокруг изovalентной примеси.

Аморфный кремний с низкой плотностью локализованных состояний, получаемый обычно в процессе разложения силана (SiH_4) и содержащий до 25 % связанного водорода [4], в отличие от негидрогенизированного $a\text{-Si}$ достаточно легко поддается легированию примесями замещения, такими как бор и фосфор [4]. Если в пленках $a\text{-Si} : \text{Ge}$ плотность локализованных состояний действительно снижена, то они, так же как $a\text{-Si} : \text{H}$, должны быть весьма чувствительными к введению в них доноров или акцепторов.

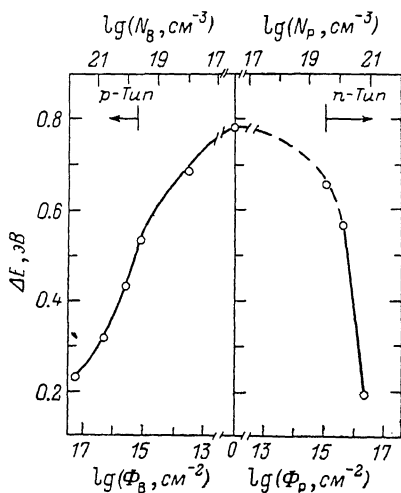
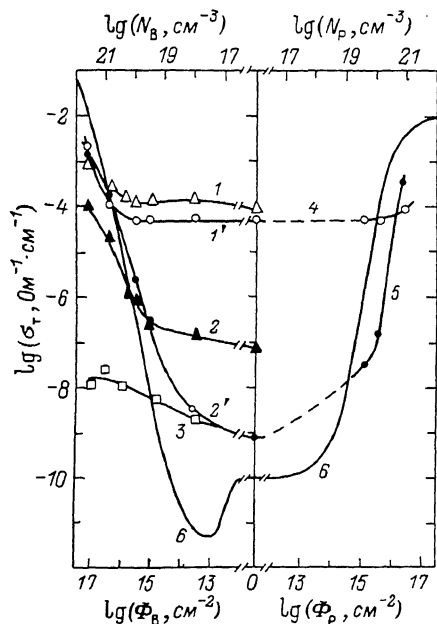


Рис. 1. Зависимость проводимости слоев $a\text{-Si}$ (1, 2) и $a\text{-Si} : \text{Ge}$ (1', 2', 4, 5) от дозы облучения ионами бора и фосфора.

Рис. 2. Зависимость энергии активации проводимости слоев $a\text{-Si} : \text{Ge}$, легированных имплантацией бора и фосфора.

1, 1', 4 — без отжига, 2, 2', 5 — после отжига при 400°C ; 3 — проводимость слоев $a\text{-Si} : \text{Ge}$, облученных ионами аргона и отожженных при 400°C ; 6 — данные [6] для $a\text{-Si} : \text{H}$.

В настоящей работе представлены экспериментальные данные по ионно-лучевому легированию донорной и акцепторной примесью аморфного кремния, содержащего малые добавки германия. Показано, что $a\text{-Si} : \text{Ge}$ и по отношению к легированию подобен гидрогенизированному аморфному кремнию.

Исходные тонкие ($\sim 250\text{--}300$ нм) слои аморфного кремния были напылены электронно-лучевым испарением в вакууме $8 \cdot 10^{-5}$ Па на силалловые подложки при температуре 120°C . Введение изovalентной примеси германия осуществлялось методом ионной имплантации. Энергия ионов Ge^+ составляла 250 кэВ, доза $1.6 \cdot 10^{15}$ см^{-2} . Легирование полученных таким образом пленок $a\text{-Si} : \text{Ge}$, а также слоев $a\text{-Si}$ осуществлялось имплантацией ионов B^+ с энергией 40 кэВ или фосфора с энергией 120 кэВ дозами от $3.2 \cdot 10^{13}$ до $1.3 \cdot 10^{17}$ см^{-2} . Плотность ионного тока не превышала 1 мкА/ см^2 . Был выполнен также ряд контрольных экспериментов с образцами, облученными ионами аргона в том же интервале доз, что и для легирующей примеси. Отметим, что энергия для каждого сорта ионов выбиралась таким образом, чтобы максимум распределения ионов находился примерно на половине толщины пленки. Отжиг радиационных дефектов осуществлялся при температуре 400°C в вакууме $4 \cdot 10^{-3}$ Па в течение 30 мин. При измерении проводимости использовались алюминиевые контакты,

напряженность поля между которыми не превышала 10^9 В/см. Контроль структуры осуществлялся электронографическим методом на отражение.

На рис. 1 приведены зависимости темновой проводимости (σ_T) слоев a -Si и a -Si : Ge от дозы облучения ионами B^+ , P^+ и Ag^+ до и после термического отжига. Там же для сравнения показаны аналогичные зависимости, полученные в [5] при ионном легировании бором и фосфором аморфного гидрогенизированного кремния. Имплантация ионов в a -Si : H в [5] проводилась при температуре мишени $280^\circ C$.

Поскольку нами более детально исследовался аморфный кремний, имплантированный бором, обсудим сначала эти результаты. Дозовые зависимости σ_T легированных слоев a -Si и a -Si : Ge, измеренные непосредственно после облучения ионами B^+ , представлены кривыми 1 и 1' соответственно в левой части рис. 1. Для обоих материалов наблюдается качественное сходство в поведении проводимости. При дозах $\Phi < 2 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$ σ_T практически не изменяется с ростом дозы, а увеличение дозы B^+ выше этого значения приводит к увеличению проводимости примерно на порядок. Этот результат хорошо согласуется с ранее опубликованными данными [6] по ионному легированию a -Si и обусловлен проявлением электрической активности незначительной части внедренного бора. Основная доля примеси в этом случае играет роль компенсирующих центров для локализованных состояний, плотность которых увеличивается при облучении за счет радиационных дефектов [6]. Заметим при этом, что проводимость a -Si примерно на 40 % выше, чем проводимость a -Si : Ge, как для необлученных образцов, так и для образцов, имплантированных бором с $\Phi < 2 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$. При $\Phi = 1.3 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$ пленка a -Si : Ge более чувствительна к внедрению примеси по сравнению с a -Si. Оба эти факта, а также учет того, что при комнатной температуре основной вклад в проводимость дает прыжковая составляющая, дополнительно свидетельствуют о снижении плотности локализованных состояний в аморфном кремнии с добавкой изовалентной примеси германия по сравнению с a -Si без германия.

Последующий отжиг приводит к усилению различия в поведении зависимости $\sigma_T = f(\Phi)$ в a -Si и в a -Si : Ge (кривые 2, 2'). Значения σ_T нелегированных образцов после термообработки сильно уменьшаются: до 10^{-7} Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$ для a -Si и $\sim 10^{-8}$ для a -Si : Ge. Это обусловлено отжигом структурных дефектов в обоих материалах. В последнем случае дефекты отжигаются более эффективно за счет дополнительной перестройки атомного окружения вблизи изовалентной примеси германия [3]. В имплантированных ионами бора и отожженных образцах проводимость резко растет с дозой. При этом для a -Si : Ge в исследуемой области доз она увеличивается от 10^{-9} до $1.6 \cdot 10^{-3}$ Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$, т. е. на 6 порядков. В то же время для аморфного кремния, не содержащего примеси германия, она увеличивается всего на 3 порядка (от 10^{-7} до 10^{-4} Ом $^{-1}$ ·см $^{-1}$). Измерение знака термоэдс свидетельствует о том, что проводимость слоев a -Si : B и a -Si : Ge : B имеет дырочный характер. Таким образом, эффективность легирования бором для аморфного кремния с примесью германия значительно выше, чем для a -Si.

Для того чтобы показать, что наблюдаемый рост проводимости связан именно с эффектом легирования, а не с влиянием радиационных дефектов, мы измерили зависимость $\sigma_T(\Phi)$ для образцов a -Si : Ge, облученных ионами Ag^+ и отожженных при тех же условиях (кривая 3). Видно, что, несмотря на большую массу внедренных ионов и, следовательно, большую концентрацию внедренных радиационных дефектов, в этих образцах проводимость увеличивается в исследованном интервале доз только на порядок. Эти данные дают дополнительные основания утверждать, что эффект легирования имеет место.

Аналогичные данные получены нами и при имплантации в a -Si : Ge ионов фосфора (кривые 4, 5). При этом легированные слои имели проводимость n -типа.

Для всех образцов a -Si : Ge, легированных бором и фосфором, нами были изучены температурные зависимости проводимости в области от 160 до 500 К. Высокотемпературные участки (самый меньший из которых 260–500 К) этих зависимостей хорошо описываются выражением $\sigma = \sigma_0 \exp(-\Delta E/kT)$. Энергия активации, представляющая собой разность ($E_F - E_c$) для слоев p -типа или ($E_c - E_F$) для слоев n -типа, уменьшается с ростом дозы от 0.78 до 0.2 эВ (рис. 2).

Это значит, что введение в $a\text{-Si} : \text{Ge}$ атомов бора или фосфора приводит к смещению уровня Ферми от середины щели подвижности к E_v или E_c соответственно. При максимальных дозах ($\sim 10^{17} \text{ см}^{-2}$) энергетический зазор ($E_F - E_v$) или ($E_c - E_F$) составляет 0.2 эВ. Это хорошо согласуется с литературными данными для легированного бором и фосфором гидрогенизированного аморфного кремния [5].

Если сравнить зависимости σ_T (Φ) для $a\text{-Si} : \text{Ge}$ с аналогичными зависимостями для $a\text{-Si} : \text{H}$ (рис. 1), то можно видеть, что эффективность легирования $a\text{-Si} : \text{H}$ выше. Мы надеемся, однако, что при более тщательном подборе концентрации германия и условий имплантации, в частности температуры мишени, на $a\text{-Si} : \text{Ge}$ будут получены лучшие результаты.

Л и т е р а т у р а

- [1] Хохлов А. Ф., Машин А. И., Ершов А. В., Машин Н. И., Ларина Е. В. — ФТП, 1985, т. 19, в. 12, с. 2204—2206.
- [2] Хохлов А. Ф., Машин А. И., Ершов А. В., Мордвинова Ю. А., Машин Н. И. — ФТП, 1986, т. 20, в. 7, с. 1288—1291.
- [3] Хохлов А. Ф., Ершов А. В., Машин А. И., Мордвинова Ю. А. — ФТП, 1987, т. 21, в. 10, с. 1907—1909.
- [4] Ле Комбер П., Спир У. — В кн.: Аморфные полупроводники. М., 1982, с. 312—354.
- [5] Kalbitzer S., Muller G., Le Comber P. G., Spear W. E. — Phil. Mag. B, 1980, v. 41, N 4, p. 439—456.
- [6] Хохлов А. Ф., Ершов А. В., Машин А. И. — В кн.: Тез. докл. VII Межд. конф. «Ионная имплантация в полупроводниках и других материалах». Вильнюс, 1983, с. 209—210.

Горьковский исследовательский
физико-технический институт
ГГУ им. Н. И. Лобачевского

Получено 25.01.1988
Принято к печати 18.03.1988

ФТП, том 22, вып. 8, 1988

РЕЗОНАНСНЫЕ СОСТОЯНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ВАКАНСИЯМИ ХАЛЬКОГЕНА, В ЭЛЕКТРОННОМ СУЛЬФИДЕ СВИНЦА

Вейс А. Н., Крупицкая Р. Ю., Лумер А. В.

Вакансии халькогена ($V_{\text{хг}}$) являются электроактивными дефектами в полупроводниках типа $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ и в настоящее время интенсивно изучаются как электрофизическими методами [1, 2], так и методами ИК спектроскопии [1, 3]. Исключение из всей группы материалов $\text{A}^{\text{IV}}\text{B}^{\text{VI}}$ составляет сульфид свинца, для которого, насколько нам известно, отсутствуют данные по явлениям переноса, а спектры коэффициента поглощения $\alpha(\hbar\omega)$ были исследованы лишь при 300 К в составах $\text{Pb}_{1-x}\text{Me}_x\text{S}$ ($\text{Me} - \text{Sn}, \text{Ge}; 0.01 \leq x \leq 0.03$ [4]). Выявленные в них колоколообразные полосы дополнительного поглощения были приписаны $V_{\text{хг}}$ лишь по аналогии с данными для PbSe [3].

Настоящая работа является продолжением [4] и выполнена с целью получения дополнительных доказательств о связи наблюдавшихся в [4] особенностей спектров $\alpha(\hbar\omega)$ с $V_{\text{хг}}$. В ней при 90—300 К исследованы спектры $\alpha(\hbar\omega)$ как в $\text{Pb}_{0.99}\text{Ge}_{0.01}\text{S}$, так и в PbS с варьируемым содержанием вакансий халькогена. Для увеличения концентрации $V_{\text{хг}}$ было использовано явление самокомпенсации [5]. В соответствии с [5] сульфид свинца легировался таллием и сравнимым количеством сверхстехиометрического свинца $\text{Pb}_{\text{нзб}}$. Уменьшение содержания $V_{\text{хг}}$ в образцах осуществлялось при помощи введения в шихту примеси хлора, занимающей места в подрешетке халькогена [6].

Полученные в работе экспериментальные результаты показаны на рис. 1. Видно, что спектральные зависимости $\alpha(\hbar\omega)$ в $\text{PbS} \langle \text{Tl}, \text{Pb}_{\text{нзб}} \rangle$ подобны приведенным в [4] для $\text{Pb}_{1-x}\text{Me}_x\text{S}$. В длинноволновой области экспериментальных спектров, как и в [4], наблюдаются несимметричные полосы дополнительного поглощения α_1 , обладающие резкой красной границей $E_{\text{кр}}$, а в диапазоне средних длин волн — колоколообразные особенности α_2, α_3 . Полосы α_1 были при-