

при сравнении поляризационно-оптических микрофотографий до и после ультразвукового воздействия.

Различие в дислокационной структуре этих образцов отражается на графиках $\Delta f(\epsilon^0)$ следующим образом. Отклонение от параболической зависимости кривой $\Delta f(\epsilon^0)$ предварительно изогнутого образца, в отличие от контрольного (2') и упрочненного ультразвуком (3), начинается практически сразу после приложения нагрузки. То есть на изменение частоты существенно влияет не только наличие «свежих» дислокаций, но и их распределение. По мере того как распределение дефектов в изогнутом образце приближается к виду, характерному для ультразвукового воздействия, и внутренние напряжения релаксируют, графики $\Delta f(\epsilon^0)$ для образцов 2' и 4 сближаются. Подчеркнем, что в том же интервале амплитуд график $\Delta f(\epsilon^0)$ предварительно упрочненного ультразвуком образца соответствует температурному ходу $\Delta f(T)$ [4].

Поскольку Δf , и $\Delta E/E$ связаны соотношением (2), то все сказанное выше о влиянии структурных дефектов на изменение частоты в равной мере относится и к дефекту модуля Юнга. Поэтому зависимости Δf , и $\Delta E/E$ от ϵ приведены на одних и тех же рисунках (рис. 3 и 5).

Таким образом, проведенные эксперименты и их анализ позволяют заключить, что дефект модуля Юнга образца, находящегося в поле знакопеременной нагрузки, в значительной степени определяется особенностями дислокационной структуры: распределением дислокаций по длине и сечению образца.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Швидковский Е. Г., Дугарян А. А. // Научн. докл. высшей школы — Физ.-мат. науки. 1958. 1, № 5. С. 211.
- [2] Тяпунина Н. А., Благовещенский В. В., Зиненкова Г. М., Ивашкин Ю. А. // Изв. вузов, Физика. 1982. № 6. С. 118.
- [3] Зиненкова Г. М., Пала Е. В. Деп. ВИНТИ № 541-В89Деп. М., 1989.
- [4] Пала Е. В. Особенности пластического деформирования ультразвуком щелочногалогенных кристаллов: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1992.
- [5] Леготин Д. Л. Влияние дислокационной структуры на дефект модуля Юнга щелочногалогенных кристаллов: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М. (МГУ), 1993.

Поступила в редакцию
14.04.94

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 1

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЕГИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ НА ПРОВОДИМОСТЬ, ФОТОПРОВОДИМОСТЬ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОГЛОЩЕНИЯ КОМПЕНСИРОВАННОГО a-Si:H

А. Г. Казанский, А. В. Мельников, Д. Г. Яркин

(кафедра физики полупроводников)

Исследовано влияние уровня легирования и степени компенсации на электрические, фотоэлектрические и оптические свойства компенсированного гидрированного аморфного кремния (a-Si:H). Полученные результаты объясняются влиянием положения уровня Ферми и вызванных введением примесей крупномасштабных флуктуаций потенциала на величину коэффициента поглощения (α) и фотопроводимости (σ_{ph}) и форму зависимостей $\alpha(h\nu)$ и $\sigma_{ph}(T)$.

Легирование аморфного гидрированного кремния (α -Si:H) донорами или акцепторами приводит к смещению уровня Ферми (E_f) соответственно к краю зоны проводимости (E_c) или валентной зоны (E_v). Поэтому изменения электрических и фотоэлектрических свойств α -Si:H, происходящие в результате легирования, в большинстве случаев связывают с изменением положения E_f . В то же время известно, что при введении примесей изменяется также распределение плотности состояний в щели подвижности. В связи с этим представляет интерес изучение компенсированного α -Si:H, поскольку использование различных уровней компенсации позволяет независимо изменять концентрацию введенных примесей и положение E_f в щели подвижности.

Нами были исследованы пленки компенсированного α -Si:H, полученные разложением в тлеющем разряде смеси газов моносилана (SiH_4), фосфина (PH_3) и диборана (B_2H_6) при температуре подложки 250°C . Степень компенсации пленок изменялась варьированием отношения объема PH_3 к объему SiH_4 ($k_1 = [\text{PH}_3]/[\text{SiH}_4]$) и B_2H_6 к SiH_4 ($k_2 = [\text{B}_2\text{H}_6]/[\text{SiH}_4]$) в газовой смеси. В дальнейшем для обозначения уровня легирования и степени компенсации пленок мы будем использовать параметр k , записанный в виде $k = k_2 \cdot 10^6 / (k_1 \cdot 10^6)$. На поверхность пленок, толщина которых составляла ~ 1 мкм, напылялись хромовые контакты. Измерения проводились после отжига пленок в вакууме при 180°C в течение 30 мин. Спектральные зависимости коэффициента поглощения α измерялись методом постоянного фототока. Фотопроводимость σ_{ph} определялась при возбуждении пленок светом с энергией квантов $h\nu = 1,9$ эВ и интенсивностью $\sim 10^{14}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$.

На рис. 1, а представлены значения темновой проводимости σ для

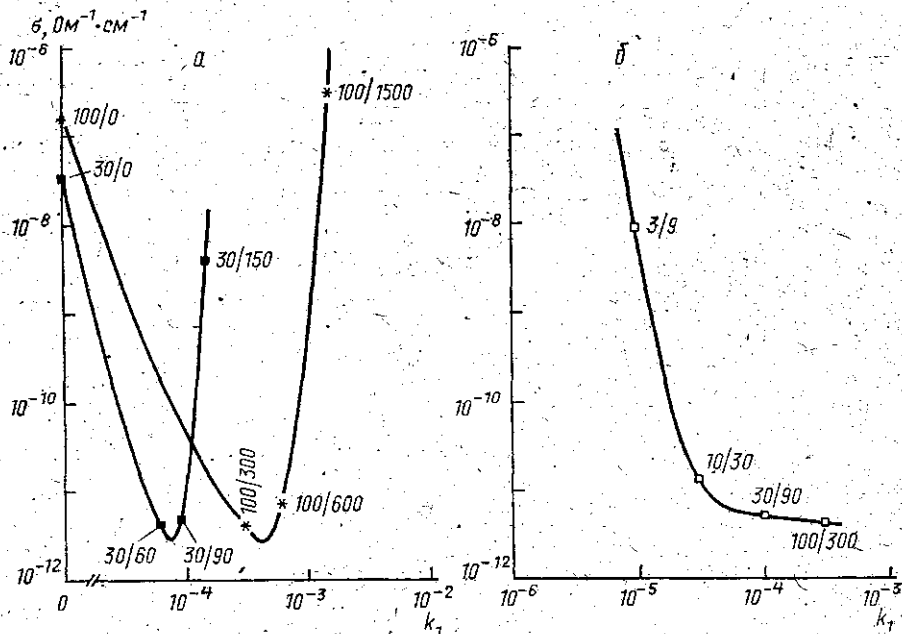


Рис. 1. Зависимость проводимости компенсированных пленок при комнатной температуре от уровня легирования фосфором при постоянном уровне легирования бором (а) и при постоянной степени компенсации (б). Уровни легирования бором и фосфором указаны на рисунке

двух серий компенсированных образцов, полученных при различных значениях k_1 и постоянных для каждой серии значениях k_2 ($3 \cdot 10^{-5}$ и

10^{-4}). Увеличение содержания фосфина приводит к изменению типа проводимости в пленках от проводимости p - к проводимости n -типа. Проводимость пленок, имеющих минимальное значение σ , по-видимому, определяется как электронами, так и дырками. Значения σ для компенсированных пленок, осажденных в условиях постоянного значения k , показаны на рис. 1, б. Как видно из рис. 1, б, увеличение концентрации примесей приводит к уменьшению проводимости пленок. Одной из возможных причин наблюдаемого изменения σ в этом случае может быть различная эффективность введения атомов фосфора и бора. На рис. 2 показаны зависимости концентраций атомов фосфора

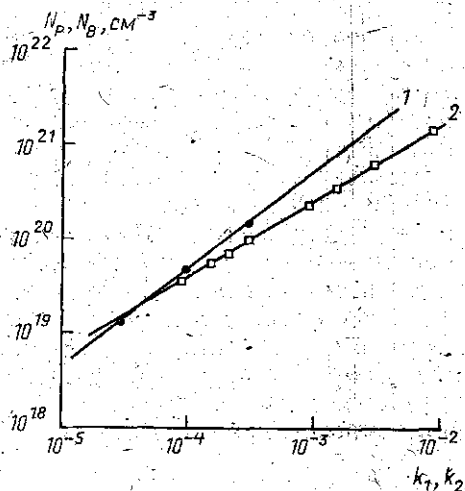


Рис. 2. Зависимость концентрации атомов бора в пленке (N_B) от концентрации диборана в газовой смеси (k_2) (1) и атомов фосфора в пленке (N_P) от концентрации фосфина в газовой смеси (k_1) (2) [1].

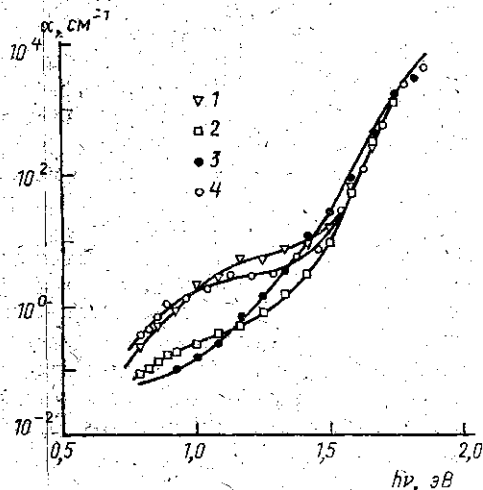


Рис. 3. Спектральные зависимости коэффициента поглощения для серии пленок с постоянной степенью компенсации: $k=3/9$ (1), $10/30$ (2), $100/300$ (3) и для нелегированной пленки (4).

(N_P) и бора (N_B) в пленках от содержания фосфина и диборана в газовой смеси [1]. Из рисунка видно, что с ростом содержания легирующего газа концентрация атомов бора возрастает сильнее по сравнению с концентрацией атомов фосфора. Если данное соотношение выполняется также для концентраций электрически активных примесей, то увеличение k_1 и k_2 при постоянном значении k может привести к смещению уровня Ферми к середине щели подвижности и соответственно к уменьшению σ .

Рассмотрим влияние компенсации на спектральную зависимость коэффициента поглощения. Зависимости $\alpha(h\nu)$ для пленок с постоянной величиной k представлены на рис. 3. Для сравнения на этом же рисунке показана спектральная зависимость α для нелегированного образца. Как видно из рисунка, поглощение в области «хвоста Урбаха» ($1,5 \text{ эВ} < h\nu < 1,7 \text{ эВ}$) для компенсированных пленок, за исключением пленки с максимальным уровнем легирования ($k=100/300$), совпадает с зависимостью $\alpha(h\nu)$ для нелегированного образца. Зависимость $\alpha(h\nu)$ для пленки с $k=100/300$ в указанной спектральной области слабее. Аналогичные результаты были получены в работах [1, 2]. Авторы [1, 2] связывают уменьшение крутизны хвоста поглощения в компенсированных пленках с $k_2 \geq 10^{-4}$ с возникновением в них крупномасштабных флуктуаций потенциала.

Наибольшее изменение α наблюдается в области «дефектного» поглощения ($h\nu < 1,3$ эВ). Увеличение концентрации введенных примесей при неизменной величине k приводит к уменьшению коэффициента поглощения в «дефектной» области спектра (α_d), что свидетельствует об уменьшении концентрации дефектов (N_d) в этих пленках. Отметим, что уменьшение N_d коррелирует с уменьшением проводимости пленок (рис. 1, б) и соответственно со смещением уровня Ферми к середине щели подвижности. Этот результат согласуется с имеющимися данными о том, что определяющим величиной N_d фактором является положение уровня Ферми в щели подвижности a -Si:H, а не концентрация введенной примеси [3].

Сопоставление формы спектральной зависимости α_d для нелегированной пленки и компенсированных пленок n -типа с $k=3/9$ и $10/30$ указывает на увеличение относительного вклада в α_d компенсированных пленок состояний, расположенных вблизи хвоста валентной зоны. В частности, плотность состояний образца с $k=3/9$, полученная в результате дифференцирования $\alpha(h\nu)$ по $h\nu$ [4], обнаруживает максимум при энергии $E_c - E \approx 1,1$ эВ. В то же время для нелегированного a -Si:H максимум плотности состояний, соответствующий нейтральным оборванным связям, расположен при $E_c - E \approx 0,9$ эВ. Заметим, что в пленках n -типа, легированных только фосфором, максимум плотности состояний, расположенный при $E_c - E \approx 1,1$ эВ, связывают с отрицательно заряженными оборванными связями [3].

Рассмотрим результаты измерений фотопроводимости компенсированных пленок a -Si:H. На рис. 4 представлены значения σ_{ph} иссле-

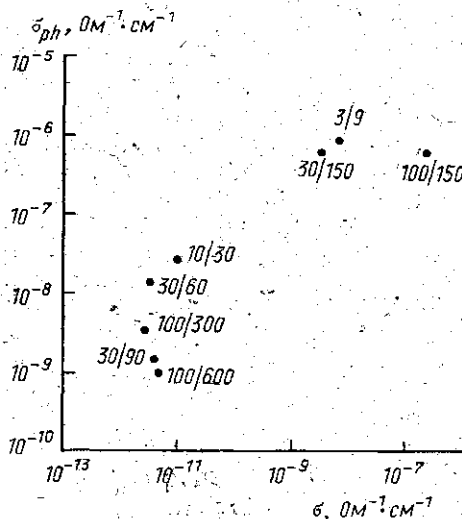


Рис. 4. Зависимость фотопроводимости исследованных пленок от темновой проводимости при комнатной температуре. Уровень легирования бором и фосфором указаны на рисунке

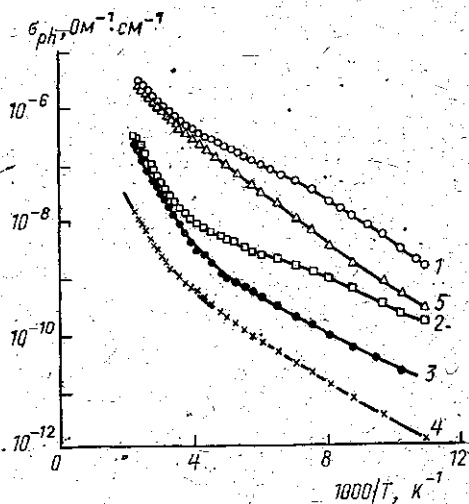


Рис. 5. Зависимости фотопроводимости от температуры для пленок с постоянной степенью компенсации ($k=3/9, 10/30, 30/90$) и пленок с постоянным уровнем легирования бором ($k=30/60, 30/90, 30/150$); $k=3/9$ (1), $10/30$ (2), $30/60$ (3), $30/90$ (4) и $30/150$ (5)

дованных пленок при комнатной температуре. Как видно из рисунка, σ_{ph} уменьшается при уменьшении σ и, соответственно при смещении E_f к середине щели подвижности. Наблюдаемая корреляция σ и σ_{ph} свидетельствует о том, что, как и в случае a -Si:H, легированного од-

ним типом примесей [5], положение E_f в компенсированных пленках является важным фактором, определяющим концентрацию основных центров рекомбинации — нейтральных оборванных связей. В компенсированных пленках с максимальной концентрацией примесей возможно уменьшение σ_{ph} вследствие уменьшения подвижности неравновесных носителей. Уменьшение подвижности может быть вызвано большой концентрацией заряженных примесей и возникновением крупномасштабных флуктуаций потенциала [6].

Информация о влиянии компенсации на процессы рекомбинации может быть получена из температурных зависимостей σ_{ph} , которые представлены на рис. 5. Для пленок с минимальным уровнем легирования ($k=3/9$ и $10/30$) зависимость $\sigma_{ph}(T)$ имеет вид, характерный для нелегированного a -Si:H. По мере понижения температуры зависимость σ_{ph} сначала ослабляется, что связывают с «очувствлением» фотопроводимости вследствие захвата дырок на состояния хвоста валентной зоны [7]. В этой температурной области может наблюдаться температурное гашение фотопроводимости. При дальнейшем понижении температуры зависимость $\sigma_{ph}(T)$ приобретает экспоненциальный характер в результате возникновения туннельной рекомбинации с состояний хвоста зоны проводимости [8]. Увеличение концентрации введенных примесей приводит к изменению характера зависимости $\sigma_{ph}(T)$, в частности к исчезновению участка «очувствления» σ_{ph} . Например, значения σ_{ph} пленок с $k=30/150$ и $k=3/9$, имеющих близкие значения σ и соответственно положения E_f , совпадают в области температур, превышающих комнатную. Исчезновение участка «очувствления» σ_{ph} для пленки с $k=30/150$, по нашему мнению, связано с увеличением вклада туннельной рекомбинации в области промежуточных температур. Возможность возрастания туннельного рекомбинационного потока через состояния хвостов зон в условиях возникновения крупномасштабных флуктуаций потенциала в компенсированном a -Si:H отмечалась в работах [2, 9]. В случае пленок с $k=30/60$ и $30/90$, имеющих минимальное значение проводимости, зависимость $\sigma_{ph}(T)$, по-видимому, определяется вкладом в фотопроводимость как электронов, так и дырок.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что электрические и фотоэлектрические свойства компенсированных пленок a -Si:H могут быть удовлетворительно описаны на качественном уровне в рамках имеющихся представлений о влиянии положения уровня Ферми и крупномасштабных флуктуаций потенциала на перенос и рекомбинацию неравновесных носителей.

В заключение авторы выражают искреннюю признательность проф. В. Фусу и д-ру Х. Меллу за предоставление компенсированных пленок a -Si:H.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Rath J. K., Fuhs W., Mell H. // Phys. Stat. Solidi. 1992. B128. P. 156.
- [2] Howard J. A., Street R. A. // Phys. Rev. 1991. B44. P. 7935.
- [3] Pierz K., Fuhs W., Mell H. // Phil. Mag. 1991. B63. P. 123.
- [4] Pierz K., Mell H., Terukov J. // J. Non-Cryst. Sol. 1985. 77/78. P. 547.
- [5] Spear W. E., Steemers H. L., LeComber P. G., Gibson R. A. // Phil. Mag. 1984. B50. P. 133.
- [6] Spear W. E., Cloude C., Goldie D., LeComber P. G. // J. Non-Cryst. Sol. 1987. 97/98. P. 15.
- [7] Fuhs W., Welsch H. M., Booth D. C. // Phys. Stat. Solidi. 1983. B120. P. 197.
- [8] Hoheisel M., Fuhs W. // Phil. Mag. 1988. B57. P. 411.
- [9] Ts'ang C., Street R. A. // Phys. Rev. 1979. B19. P. 3027.

Поступила в редакцию
08.07.94