

тельствует о меньшей величине a_M в германии с РД. Вид температурных кривых удельного сопротивления для германия с РД свидетельствует о том, что энергия активации проводимости исчезает при $N_{PD} \approx 4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. К сходным выводам приводят также данные работы [4], представленные на рис. 1. Таким образом, можно заключить, что боровский радиус при переходе Мотта ($a_M \approx \approx 30 \text{ \AA}$ для германия с РД) существенно меньше, чем боровский радиус, обеспечивающий прыжковую проводимость ($a = 40 \text{ \AA}$).

На рис. 2 приведены зависимости величины боровского радиуса от среднего расстояния между примесями для германия с РД, германия, легированного Ga [6] и InSb [6]. Отметим, что сопоставление этих кривых указывает на значительно меньшую зависимость боровского радиуса от расстояния между примесями в германии с РД по сравнению с германием, легированным галлием, причем величина боровского радиуса оказывается ближе к расчетной, получаемой с использованием эффективной массы тяжелых дырок.

Список литературы

- [1] Доброго В. П., Ермолаев О. П. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 5. С. 999—1001.
- [2] Dobrego V. P., Ermolaev O. P., Tkachev V. D. // Phys. St. Sol. (a). 1977. V. 44. № P. 435—442.
- [3] Мотт Н. Ф. Переходы металл—изолятор. М., 1979. 342 с.
- [4] Кожух М. Л., Липкина Н. С., Шлимак И. С. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 2. С. 331—336
- [5] Chroboczek J. A. // Proc. XI Conf. «Physics of Semiconducting Compounds». Jaszowia Poland, 1981. V. 4. P. 69—80. Fritzche H. // J. Phys. Chem. Sol. 1958. V. 6. P. 68—80
- [6] Гершензон Е. М., Куриленко И. Н., Литвак-Горская Л. Б. // ФТП. 1974. Т. 8. В. 6. С. 1186—1190.

Белорусский
государственный университет
им. В. И. Ленина
Минск

Получено 28.04.1989
Принято к печати 11.08.1989

ФТП, том 24, вып. 3, 1990

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛОЖЕНИЯ УРОВНЯ ФЕРМИ В АМОРФНОМ ГИДРИРОВАННОМ КРЕМНИИ *n*-ТИПА

Казанский А. Г.¹

Как известно, в нелегированном и легированном донорами аморфном гидрированном кремнии ($a\text{-Si} : \text{H}$) температурная зависимость проводимости определяется выражением $\sigma = \sigma_0 \exp [-(E_c - E_f)/kT]$, где E_f — положение уровня Ферми, а E_c — положение края зоны проводимости, вблизи которого происходит движение носителей заряда [1]. В предположении линейной температурной зависимости положения уровня Ферми относительно края зоны проводимости можно записать $(E_c - E_f)_T = E_a - \gamma T$, где значения E_a и γ , вообще говоря, зависят от области температур, в которой проводится линейная экстраполяция, причем величина γ определяется температурным изменением положения E_f и E_c [1]. В этом случае $\sigma = \sigma_0 \exp (\gamma/k) \exp (-E_a/kT)$. В ряде работ, посвященных исследованию $a\text{-Si} : \text{H}$, величина E_a используется для получения информации о положении уровня Ферми. При этом изменение E_a , происходящее при различных воздействиях на $a\text{-Si} : \text{H}$ (легирование, облучение светом), непосредственно связывают с изменением положения E_f [2—4]. В то же время температурная з

¹ Работа выполнена в Марбургском университете.

висимость E_f определяется статистическим сдвигом уровня Ферми [5]. Соответственно отличие E_a от $(E_c - E_f)$ при данной температуре определяется формой плотности состояний в области энергий, в которой происходит температурное смещение E_f .

В настоящей работе проведены сравнительные измерения величины E_a в области комнатных температур и положения E_f относительно E_c для образцов $a\text{-Si} : \text{H}$ n -типа с различным уровнем легирования. Положение уровня Ферми определялось из измеренных значений темновой проводимости [6, 7]. При расчетах использовалось значение $\sigma_0 = 150 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, которое, согласно [7], наиболее вероятно для $a\text{-Si} : \text{H}$.

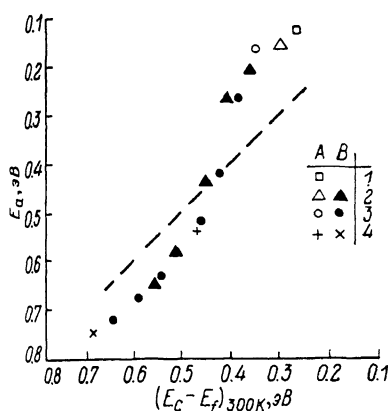


Рис. 1. Корреляция величины энергии активации температурной зависимости проводимости (E_a) и положения уровня Ферми относительно края зоны проводимости при комнатной температуре ($E_c - E_f$)_{300 К}.

Данные соответствуют образцам 1, 2, 3, 4, полученным при относительной концентрации фосфина в газовой смеси с силаном 10^{-4} , 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} . Представлены результаты для образцов в отожженном состоянии (А) и после их освещения в течение различного времени (В).

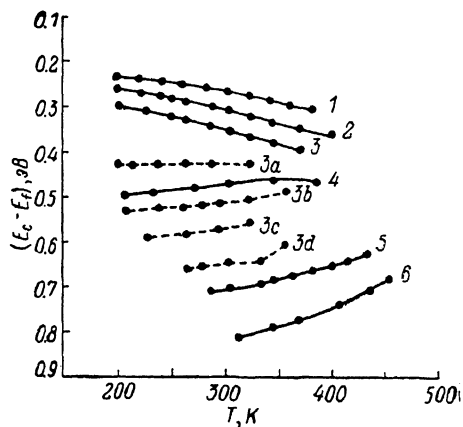


Рис. 2. Температурные зависимости положения уровня Ферми относительно зоны проводимости ($E_c - E_f$) для легированных (1-4) и нелегированных (5, 6) образцов $a\text{-Si} : \text{H}$. 3а, 3б, 3с, 3д соответствуют образцу 3 после его освещения в течение 1, 2, 15 и 960 мин.

В работе исследовались легированные фосфором образцы $a\text{-Si} : \text{H}$, полученные разложением моносила в ВЧ тлеющем разряде при температуре подложки $T_s = 250 \text{ К}$. Легирование осуществлялось введением фосфина в реакционную камеру. Относительная концентрация фосфина в газовой смеси с силаном ($[\text{PH}_3]/[\text{SiH}_4]$) изменялась от 10^{-7} до 10^{-4} . Перед измерениями образцы отжигались в вакууме в течение 30 мин при температуре $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Измерения проводились как для отожженных образцов, так и после их освещения светом лампы накаливания через тепловой фильтр с интенсивностью 50 мВ/см^2 . Облучение позволяло изменять для данного образца величину проводимости и энергию активации ее температурной зависимости [8].

На рис. 1 показана корреляция величины E_a , измеренной в области комнатных температур, и положения уровня Ферми относительно зоны проводимости при $T = 300 \text{ К}$. Представлены данные как для отожженных образцов, так и после их освещения в течение различного времени. Как видно из рисунка, значение E_a близко к величине $(E_c - E_f)_{300 \text{ К}}$ в области $E_a = (0.4 - 0.45) \text{ эВ}$. Для $E_a < 0.4 \text{ эВ}$ значение E_a меньше $(E_c - E_f)_{300 \text{ К}}$. В то же время в области $E_a > 0.45 \text{ эВ}$ имеем $E_a > (E_c - E_f)_{300 \text{ К}}$. Заметим, что изменение E_a , происходящее при легировании и освещении, приводит к одинаковому изменению $(E_c - E_f)_{300 \text{ К}}$.

Полученные результаты можно объяснить различным характером температурных зависимостей положения уровня Ферми для $(E_c - E_f) > 0.45$ и $(E_c - E_f) < 0.4 \text{ эВ}$. На рис. 2 показано изменение $(E_c - E_f)$ с температурой для нелегированных и легированных фосфором образцов $a\text{-Si} : \text{H}$, полученное из

температурных зависимостей проводимости. Отметим, что проведенные расчеты справедливы для области температур, в которой перенос носителей происходит по делокализованным состояниям ($T > 150-200$ К [9]). На рис. 2 представлены также данные для одного из легированных образцов после его освещения в течение различного времени. Как видно из рисунка, в области ($E_c - E_f$) < 0.4 эВ увеличение температуры приводит к смещению положения E_f к середине щели подвижности a -Si : H. В то же время для ($E_c - E_f$) > 0.45 эВ с ростом температуры положение E_f смещается к зоне проводимости. Этот результат указывает на существование минимума плотности состояний в щели подвижности в области энергий ($E_c - E_f$) = (0.4—0.45) эВ, что согласуется с данными, полученными методом релаксационной спектроскопии глубоких уровней [10]. Аналогичный характер изменения ($E_c - E_f$) с температурой для образцов, легированных литием, был представлен в работе [7]. Однако авторы [7] при расчетах использовали значение $\sigma_0 = 2000$ Ом⁻¹.см⁻¹, что привело к смещению полученных ими значений ($E_c - E_f$) в область больших энергий. Совпадение данных для ($E_c - E_f$), полученных при изменении E_a в результате легирования и длительного освещения образца (рис. 1), свидетельствует о том, что освещение не приводит к существенному изменению положения минимума плотности состояний в щели подвижности a -Si : H.

Таким образом, проведенные измерения указывают на то, что в нелегированных и легированных донорами пленках a -Si : H использование энергии активации температурной зависимости проводимости для определения положения уровня Ферми относительно зоны проводимости приводит к завышенным значениям для $E_a > 0.45$ эВ и заниженным значениям для $E_a < 0.4$ эВ.

Автор выражает искреннюю благодарность В. Фусу и Х. Меллу за предоставление образцов для исследований и полезные дискуссии.

Список литературы

- [1] Stuke J. // J. Non-Cryst. Sol. 1987. V. 97-98. P. 1—14.
- [2] Spear W. E., Steemers H. L., Le Comber P. G., Gilson R. A. // Phil. Mag. B. 1984. V. 50. N 3. P. L33—L40.
- [3] Walloch F., Ley L. // J. Non-Cryst. Sol. 1987. V. 97-98. P. 699—702.
- [4] Vanier P. E. // Solar Cells. 1983. V. 9. N 2. P. 85—93.
- [5] Yoon B.-G., Lee C., Jang J. // J. Appl. Phys. 1986. V. 60. N 2. P. 673—676.
- [6] Beyer W., Overhof H. // J. Non-Cryst. Sol. 1983. V. 59-60. P. 301—304.
- [7] Overhof H., Beyer W. // J. Non-Cryst. Sol. 1980. V. 35-36. P. 375—380.
- [8] Staebler D. L., Wronski C. R. // Appl. Phys. Lett. 1977. V. 31. N 4. P. 292—294.
- [9] Cloude C., Spear W. E., Le Comber P. G., Hourd A. C. // Phil. Mag. B. 1986. V. 54. N 4. P. L113—L118.
- [10] Lang D. V., Cohen J. D., Harbison J. P. // Phys. Rev. B. 1982. V. 25. N 8. P. 5285—5320.

Московский
государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Получено 21.06.1989
Принято к печати 11.08.1989

ФТП, том 24, вып. 3, 1990

СПЕКТР ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНЖЕКЦИОННЫХ ФОТОДИОДОВ С ВАРИЗОННОЙ БАЗОЙ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Курмашев Ш. Д., Ирха В. И., Викулин И. М.

В настоящее время большое внимание уделяется исследованию инжекционных фотодиодов (ИФД) — $p-i-n$ -структур с длинной базой, работающих в режиме двойной инжекции [1]. Показано, что вид спектральных характеристик фоточувствительности таких диодов может зависеть от интенсивности