

$\rho(E)$ в полупроводниковых синтетических алмазах существенное влияние оказывает слоистая структура пирамид нарастания граней, обусловленная неравномерным захватом примесей в процессе роста кристаллов.

Л и т е р а т у р а

- [1] Ковуэлл Э. Кинетические свойства полупроводников в сильных электрических полях. М., 1970. 384 с.
- [2] Конорова Е. А., Шевченко С. А. — ФТП, 1967, т. 1, в. 3, с. 364—370.
- [3] Reggiani L., Bosi S., Canali C. et al. — Phys. Rev. B, 1981, v. 23, N 6, p. 3050—3057.
- [4] Чуенков В. А. — Кр. сообщ. по физике ФИ АН СССР, 1985, № 4, с. 47—51.
- [5] Баранский П. И., Малоголовец В. Г., Торишини В. И., Чипенко Г. В. — ФТП, 1987, т. 21, в. 1, с. 75—79.
- [6] Добровольский В. Н., Кролевец А. Н. — ФТП, 1983, т. 17, в. 1, с. 3—12.
- [7] Гершензон Е. М., Ильин В. А., Литвак-Горская Л. Б. и др. — ФТП, 1972, т. 6, в. 10, с. 1888—1894.
- [8] Пожела Ю. К. Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках. М., 1977. 367 с.
- [9] Ахундов Г. А., Абдинов А. Ш., Кязым-заде А. Г., Мехтиев Н. М. — ФТП, 1975, т. 9, в. 5, с. 980—982.
- [10] Нечаев А. М., Синкевич В. Ф. — ФТП, 1984, т. 18, в. 2, с. 350—353.
- [11] Толстихин В. И. — ФТП, 1985, т. 19, в. 5, с. 965—968.
- [12] Басс Ф. Г., Бочков В. С., Гуревич Ю. Г. Электроны и фононы в ограниченных полупроводниках. М., 1984. 288 с.
- [13] Баяная В. Ф., Гершензон Е. М., Литвак-Горская Л. Б. — ФТП, 1968, т. 2, в. 7, с. 978—984.
- [14] Палатник Л. С., Копач Г. И. — ФТП, 1977, т. 11, в. 6, с. 1171—1173.
- [15] Торишини В. И. — В кн.: Сверхтвердые материалы в ускорении научно-технического прогресса. Киев, 1978, с. 20—26.
- [16] Ротнер Ю. М., Преснов В. А., Голембиевский Н. И. и др. — ФТП, 1974, т. 8, в. 10, с. 1994—1995.
- [17] Торишини В. И., Чипенко Г. В. — В кн.: Получение и применение сверхтвердых материалов. Киев, 1986, с. 51—53.
- [18] Казаринов Р. Ф., Сурис Р. А., Фукс Б. И. — ФТП, 1973, т. 7, в. 4, с. 688—699.

Институт сверхтвердых материалов АН УССР
Киев

Получено 4.01.1988
Принято к печати 6.05.1988

ФТП, том 22, вып. 11, 1988

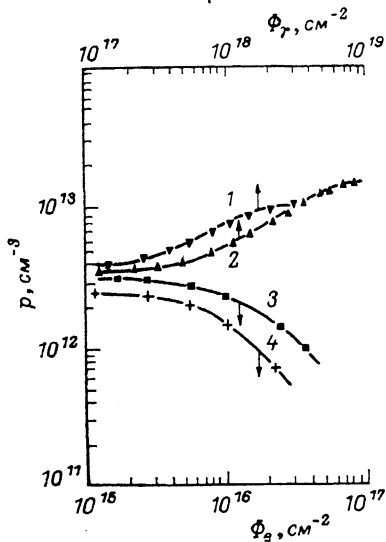
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ФОСФОРСОДЕРЖАЩИХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ И γ -ОБЛУЧЕНИИ КРЕМНИЯ

Лугаков П. Ф., Лукашевич Т. А.

При облучении зонного кремния n -типа, кроме хорошо изученных E -центров (комплексы фосфор—вакансия), образуются и другие фосфоросодержащие дефекты, природа и параметры которых в настоящее время окончательно не установлены [1—4]. В данной работе изучались накопление и параметры фосфоросодержащих комплексов, образующихся в кремнии при длительном облучении за счет перестроек E -центров.

Использовался Si n - и p -типа, выращенный методом зонной плавки с исходными удельными сопротивлениями $\rho = (1 \div 5) \cdot 10^2$ Ом·см (n -тип) и $\rho = (1 \div 60) \cdot 10^3$ Ом·см (p -тип). Концентрация фосфора в n - и бора в p -Si была $(1 \div 30) \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, а концентрация кислорода и углерода $\leq 2 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. Облучение проводилось при $T = 330$ К электронами с $E_e = 4, 6, 10$ МэВ и γ -квантами ^{60}Co . Плотность потока (интенсивность J) бомбардирующих частиц была $\sim 1 \times 10^{12}$ см $^{-2}$ ·с $^{-1}$, а их поток Φ варьировался в пределах $\Phi_e = (1 \cdot 10^{15} - 5 \cdot 10^{16})$ см $^{-2}$ и $\Phi_\gamma = (1 \cdot 10^{17} - 2 \cdot 10^{19})$ см $^{-2}$ для электронов и γ -квантов соответственно. Экспериментальные результаты получены при исследовании температурных зависимостей коэффициента Холла (ТЗКХ), измеренных на различных этапах облучения и 20-минутного изохронного отжига при $T = 100 - 700$ °С.

Образование E -центров в зонном n -Si сопровождается уменьшением концентрации свободных электронов и n - p -конверсией типа проводимости, тогда как в высокоомном как правило сильно компенсированном фосфором p -Si из-за раскомпенсации материала при связывании фосфора в нейтральные E -центры наблюдается возрастание концентрации дырок [5, 6]. После истощения фосфора концентрация дырок в кристаллах с исходным электронным (после n - p -конверсии) и дырочным типом проводимости сохраняется постоянной в некотором интервале потоков электронов (Φ_e) и γ -квантов (Φ_γ), а уровень Ферми (E_F) стабилизируется у $E_v + (0.39 \pm 0.02)$ эВ [6, 7]. Однако при дальнейшем увеличении Φ_e и Φ_γ ход дозовых зависимостей p оказывается различным при электронном и γ -облучении. На рисунке приведены такие зависимости ($T=300$ К), показывающие, что после стабилизации концентрации дырок, когда $p=(2 \div 4) \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, по мере увеличения Φ_e p уменьшается ($\Phi_e > > 3 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$) и, наоборот, растет до значений $p=(1 \div 2) \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$ в случае γ -облучения ($\Phi_\gamma > 3 \cdot 10^{17}$ см $^{-2}$). Экспериментально наблюдаемый неодинаковый ход зависимостей $p=f(\Phi)$ при облучении достаточно высокими потоками электронов и γ -квантов обусловлен, очевидно, различием в эффективностях образования собственных и «примесных» РД при этих видах бомбардирующих частиц. Заметим, что это не связано с влиянием интенсивности облучения, ибо при используемых величинах J_e и J_γ отсутствуют какие-либо особенности в процессах комплексообразования [8]. Поэтому уменьшение p с ростом Φ_e связано, на наш взгляд, с преимущественным накоплением при



Зависимость концентрации дырок при $T=300$ К от потока γ -квантов ^{60}Co (1, 2) и электронов 4 МэВ (3, 4) в n -Si (2, 3) и p -Si (1, 4).

$n_0, p_0, \text{см}^{-3}$: 1, 4 — $8 \cdot 10^{11}$, 2, 3 — $1 \cdot 10^{11}$.

электронном облучении дивакансий, вносящих в нижнюю половину запрещенной зоны донорный уровень $E_v + 0.28$ эВ [7], что подтверждается и результатами экспериментов по отжигу. К тому же вероятность образования дивакансий в качестве первичных РД при облучении электронами с $E_e > > 1$ МэВ, как показывают расчеты, действительно велика [9]. В отличие от этого при γ -облучении более эффективным должен быть процесс формирования примесных РД за счет диффузионного механизма дефектообразования. При достаточно высоких потоках γ -квантов, когда весь фосфор связан в E -центры, генерируемые облучением вакансии могут участвовать в накоплении других более сложных дефектов вакансионного типа. В частности, путем присоединения вакансий к E -центрам возможно образование комплексов фосфор—две вакансии (PV_2). Как предполагалось, формирование таких комплексов, вносящих в нижнюю половину запрещенной зоны акцепторный уровень $\sim E_v + +0.34$ эВ [10], имеет место при термообработке облученного n -Si и перестройке E -центров в более сложные дефекты, отжигающиеся при $T=400$ — 500 °С. Считалось также возможным накопление комплексов PV_2 при одновременном уменьшении концентрации E -центров в случае облучения достаточно высокими потоками электронов с $E_e=1$ МэВ зонного n -Si [2]. Кроме того, при электронном (импульсном) облучении ($E_e=900$ КэВ) вводились электрически не активные в зонном n -Si и устойчивые до $T \approx 400$ °С РД, в состав которых входит фосфор [1].

В кремнии с дырочным типом проводимости, когда $E_F > E_v + 0.20$ эВ, как это было в исследуемых кристаллах, где $E_F \approx E_v + 0.39$ эВ, E -центры и генерируемые облучением вакансии электрически нейтральны [7, 11]. По-

этому образованию комплексов PV_2 должно сопровождаться освобождением дырки, если E_F расположен выше акцепторного уровня комплекса PV_2 и последний при этом заряжен отрицательно, т. е. $(PV)^0 + V^0 \rightleftharpoons (PV_2)^- + p^+$. Если же E_F расположен ниже уровня комплекса PV_2 , то он нейтрален и его образование происходит без изменения концентрации носителей заряда согласно реакции $(PV)^0 + V^0 \rightleftharpoons (PV_2)^0$. Наблюдаемое на опыте увеличение концентрации дырок при γ -облучении кристаллов, когда E_F изменяется в интервале от $E_v + 0.39$ до $E_v + 0.34$ эВ, свидетельствует в пользу того, что здесь действительно вводятся отрицательно заряженные комплексы (акцепторы) и освобождаются дырки. Из анализа ТЗКХ по дифференциальной методике [12] установлено, что этим РД, концентрация которых не превышает содержания фосфора в исследуемых кристаллах, в запрещенной зоне соответствует уровень $E_v + 0.35$ эВ. Отжиг комплексов фосфор—дивакансия происходит при $T = 400-500$ °С, что совпадает с интервалом температурной устойчивости подобных комплексов, формирующихся при термообработке n -Si, облученного сравнительно невысокими потоками γ -квантов ^{60}Co [10].

Л и т е р а т у р а

- [1] Емцев В. В., Машовец Т. В., Абдусаттаров А. Т. — ФТП, 1987, т. 21, в. 11, с. 2106—2109.
- [2] Двуреченский А. В., Кашников Б. П., Смирнов Л. С. — ФТП, 1980, т. 14, в. 5, с. 995—997.
- [3] Chen C. S., Corelli J. S., Watkins G. D. — Phys. Rev. B, 1972, v. 5, N 2, p. 510—526.
- [4] Hirata M., Hirata M., Saito H. — J. Phys. Soc. Japan, 1969, v. 27, N 2, p. 405—415.
- [5] Лугаков П. Ф., Лукьяница В. В., Шуша В. В. — ФТП, 1986, т. 20, в. 10, с. 1894—1897.
- [6] Лугаков П. Ф., Лукашевич Т. А. — ФТП, 1987, т. 21, в. 4, с. 746—748.
- [7] Козовенко И. Д., Семенюк А. К., Хиврич В. И. Радиационные эффекты в кремнии. Киев, 1974. 199 с.
- [8] Lugakov P. F., Lukyanitsa V. V. — Phys. St. Sol. (a), 1984, v. 83, N 2, p. 521—528.
- [9] Flicker H., Patterson W. R. — Appl. Phys., 1966, v. 37, N 13, p. 4998—4999.
- [10] Казакевич Л. А., Лугаков П. Ф., Лукьяница В. В., Филиппов И. М. — Ст. деп. в ВИНТИ АН СССР. М., 1987. № 6859-B37.
- [11] Watkins G. D., Troxell J. R. — Phys. Rev. Lett., 1980, v. 44, N 9, p. 593—595.
- [12] Hoffman H. J. — Appl. Phys., 1979, v. 19, N 13, p. 307—312.

Научно-исследовательский институт
прикладных физических проблем
им. А. Н. Севченко БГУ им. В. И. Ленина
Минск

Получено 26.01.1988
Принято к печати 16.05.1988

ФТП, том 22, вып. 11, 1988

О ПРОВОДИМОСТИ МАКРОСКОПИЧЕСКИ НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛЕНОК ВБЛИЗИ ПОРОГА ПРОТЕКАНИЯ В НАКЛОННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Снарский А. А.

В последнее время появились методы, позволяющие во многих случаях изучить интегральные характеристики сильно неоднородных сред, в частности найти полевые и концентрационные зависимости тензора эффективной проводимости $\hat{\sigma}^e$ — точные решения на пороге протекания в двумерном случае [1-3] и поведение вблизи порога протекания [3-6]. Тензор $\hat{\sigma}^e$ двумерных систем $[\hat{\sigma}(r) = \hat{\sigma}(x, y)]$ в магнитном поле, нормальном к плоскости XOY , рассмотрен в [2, 3, 6].

Если магнитное поле направлено вдоль оси OZ (нормально), то толщина среды d при определении $\hat{\sigma}^e$ незначительна: продольные (по отношению к плоскости пленки) компоненты плотности тока $j_{\parallel}(j_x, j_y)$ и поля $E_{\parallel}(E_x, E_y)$ не