

О ХАРАКТЕРЕ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ В АЛМАЗЕ,  
ИОННО-ЛЕГИРОВАННОМ ЛИТИЕМ

В. С. Вавилов, Е. А. Койфрова, Е. Б. Степанова, Э. М. Трухан

УДК 621.315.592:537.74

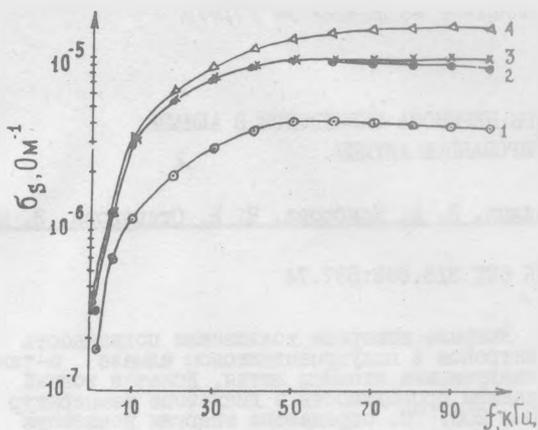
Впервые измерена холловская подвижность электронов в полупроводниковом алмазе  $n$ -типа с внедренными атомами лития. Доказан зонный механизм проводимости в диапазоне температур  $(20 + 200)^\circ\text{C}$ , определена энергия ионизации донора  $E_T = 0,10 \pm 0,015$  эВ.

Методом легирования алмаза ионами лития были получены полупроводниковые слои  $n$ -типа с восстановленной в процессе отжига кристаллической структурой /1/. Электрические измерения на них затруднены, поскольку пока не найден способ создания омических контактов к такому слою. Поэтому в данной работе электропроводность образцов алмаза с внедренными ионами лития исследовалась на переменном токе частотой  $10^3 + 10^5$  Гц, а эффект Холла - в СВЧ диапазоне (длина волны 3 см).

Отбирались образцы тем же методом, что и в работе /1/. Диапазон энергий внедренных ионов лития равнялся  $(80 + 350)$  кэВ при дозах  $(3 \cdot 10^{15} + 3 \cdot 10^{16})$  ион/см<sup>2</sup>. Образцы представляли собой полированные пластинки, вырезанные в направлении [110]. Легированная область имела форму прямоугольника. Отжиг производился при температуре  $1400^\circ\text{C}$ . Контакты получались нанесением слоя коллоидной графитовой суспензии. Во время измерений образец находился в термостате в вакууме  $10^{-5}$  тор. Температура определялась с точностью  $\pm 1$  К.

При измерении электропроводности на частоте  $10^3 + 10^5$  Гц и малом значении приложенного напряжения (менее 1 В) эквивалентная схема образца представляет собой последовательное соединение сопротивления и емкости.

На рис. 1 изображена зависимость удельной поверхностной электропроводности (т.е. проводимости 1 см<sup>2</sup> поверхности образца)  $\sigma_{\text{вас}}$



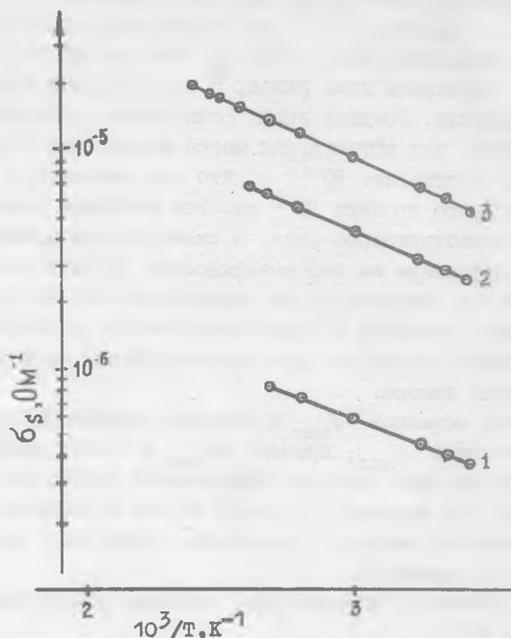
Р и с. 1. Зависимость удельной поверхностной электропроводимости алмаза, ионно-легированного литием, от частоты  $f$  при фиксированной температуре: 1 - 20 °С, 2 - 100 °С, 3 - 134 °С, 4 - 231 °С

от частоты. Величина  $\sigma_{sac}$  выходит на насыщение в интервале  $(5 + 8) \cdot 10^4$  Гц (в зависимости от образца), т.е. определяется только активной составляющей. На рис. 2 представлена зависимость  $\lg \sigma_{sac} = \varphi(1/T)$ . Вид зависимости одинаков для всех использованных доз и энергий ионов. В данном диапазоне температур экспериментальные точки хорошо укладываются на прямую. Для концентрации свободных носителей в нашем случае применимо выражение:

$$n \sim N_c \exp(-E_I/kT), \quad (1)$$

где  $E_I$  - энергия ионизации донора,  $N_c$  - эффективная плотность состояний в зоне проводимости. Поэтому следует считать, что изменения подвижности электронов  $\mu$  не влияют на зависимость проводимости от температуры. Это предположение оправдано в случае  $\mu \sim T^{-3/2}$ , т.е. когда подвижность определяется рассеянием на акустических фонах. Тогда значение энергии активации проводимости, определяемое по наклону прямых на рис. 2, равно энергии ионизации донора  $E_I$ :  $-E_a = E_I = 0,10 \pm 0,015$  эВ.

Измерения эффекта Холла и СВЧ-проводимости проводились при комнатной температуре на установке, описанной в работе /4/. Максималь-



Р и с. 2. Температурная зависимость удельной поверхностной электропроводимости алмаза, ионно-легированного литием, при различных энергиях  $E$ , кэВ и дозах  $D$ , ион/см<sup>2</sup>, внедренных ионов: 1)  $E = 110$ ,  $D = 3 \cdot 10^{15}$ , 2)  $E = 310$ ,  $D = 3 \cdot 10^{15}$ , 3)  $E = 80$ ,  $D = 6 \cdot 10^{15}$

ная величина постоянного магнитного поля была равна 6,3 кЭ, собственная частота резонатора -  $9,6 \cdot 10^9$  Гц, а его линейные размеры - радиус и длина - 1,4 и 2,0 см соответственно.

Систематическая ошибка в определении холловской подвижности носителей тока составляла 10%, а проводимости - 16%. Полученные значения холловской подвижности для разных образцов лежат в интервале  $(400 \pm 1100)$  см<sup>2</sup>/В.с, причем в пределах  $(80 \pm 350)$  кэВ

и  $(3 \cdot 10^{15} + 3 \cdot 10^{16})$  ион/см<sup>2</sup> не обнаружено ее зависимости от энергии и дозы внедренных ионов. Значение подвижности меньше величин, приведенных в работах [2,6] для изолирующих кристаллов алмаза при фотовозбуждении ( $2000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ). Это ставит под сомнение предположение, сделанное нами ранее, о преобладании рассеяния на акустических фонах. Среднее время релаксации, вычисленное в предположении о том, что эффективная масса электронов в алмазе равна  $0,2m_0$  [6], составляет  $10^{-12}$  с, что при скорости  $10^7$  см/с дает длину свободного пробега  $10^{-5}$  см. Эта величина соизмерима с толщиной полупроводникового слоя. В связи с этим следует ожидать вклада от рассеяния на его поверхностях. В этом случае зависимость подвижности от температуры не подчиняется закону  $\mu \propto T^{-3/2}$ , однако не должна отступать от него значительно, а следовательно величина энергии активации проводимости должна быть близкой к энергии ионизации донора.

Для всех образцов  $\sigma_{\text{смв}}$  в пределах ошибки эксперимента совпала со значениями  $\sigma_{\text{вас}}$ , причем  $\text{Im}\sigma_{\text{смв}} = 0$ . Эти два факта, а также довольно высокое значение эффективной холловской подвижности, показывают, что механизм переноса заряда в образцах алмаза, ионно-легированного литием, в диапазоне температур  $(20 + 200)^\circ\text{C}$  — зонный, а не прыжковый.

При комнатной температуре степень компенсации образцов  $k \geq 0,5$  ( $\pm 20\%$ ).

Таким образом, исследование методом измерений на СВЧ и сравнение полученных данных с результатами электрических измерений на низких частотах позволило выяснить характер переноса заряда в алмазе n-типа, легированном литием.

Авторы благодарны К. И. Маслову за выполнение ряда измерений на СВЧ и В. Ф. Сергиенко за помощь в подготовке кристаллов и обсуждение результатов.

Поступила в редакцию  
27 июня 1978 г.

#### Л и т е р а т у р а

Г. В. С. Вавилов, М. А. Гукасян, М. И. Гусева, Е. А. Конорова,

1. ФТП, 6, 858 (1972).
2. Е. А. Конорова, С. А. Шевченко, ФТП, I, 364 (1967).
3. A. T. Collins, A. W. S. Williams, J. Phys. C., 4, 1789 (1971).
4. Э. М. Трухан, ИТЭ, 4, 198 (1965).
5. R. L. Petritz, Phys. Rev., 110, 1254 (1958).
6. C. D. Clark, P. J. Dean, P. V. Harris, Proc. Roy. Soc., 277, 313 (1964).