

ДОНОРНОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАМЕЩАЮЩИХ АТОМОВ ПРИМЕСИ СЕРЫ В КРИСТАЛЛАХ $Ge_{1-x}Si_x$

Г.Х. АЖДАРОВ, С.М. БАГИРОВА, Р.З. КЯЗИМЗАДЕ

Институт Физики АН Азербайджана

3770143, Баку, ул. Г. Джавида, 33

Представлены результаты исследований энергии активации верхнего донорного состояния серы в кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0.3$). Энергия активации примеси определялась на основе холловских измерений.

Показано, что как в германии-, так и в кремниеподобных кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ энергия активации исследуемого уровня изменяется линейно с составом и описывается соответственно уравнениями: $E_x = E_c - (0.18 + 0.92x)$ эВ и $E_x = E_c - (0.29 + 0.05x)$ эВ.

Анализ полученных данных показывает, что глубокий донорный уровень, проявляющийся в холловских измерениях в электронных кристаллах $Ge_{1-x}Si_x$ легированных серой, относится к замещающим атомам этой примеси.

В германии, легированном серой обнаружены три глубоких донорных уровня [1]. Положение верхнего донорного уровня определено точно, и энергия его составляет $E_c - 0.18$ эВ. Два других уровня расположены недалеко от середины запрещенной зоны. Уровни, наблюдаемые в Ge легированном S, надежно не идентифицированы. Триплетное донорное поведение S в Ge может быть объяснено, если предположить, что атомы этой примеси могут размещаться как в узлах, так и междуузлиях, и, в обоих случаях, отдавать свои электроны. В отличие от германия, в кремнии сера является одной из наиболее исследованных примесей [2]. Это связано с множеством локальных уровней в запрещенной зоне кремния, порождаемых как атомами серы в изолированном состоянии в решетке, так и разнообразными комплексами и разными зарядовыми состояниями этой примеси. На основе комплексных исследований спектров основных и возбужденных состояний донорных центров, связанных с наличием серы в кремнии, в работе [2] произведена идентификация ряда наблюдаемых энергетических уровней, представленных на рис. 1. Здесь отсчет энергии ведется от дна

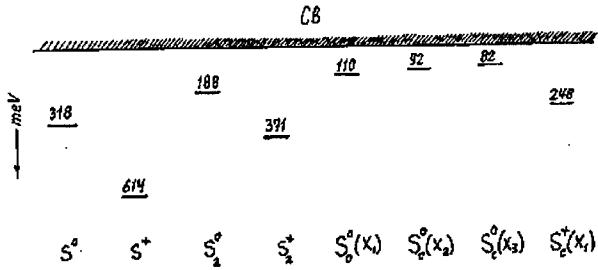


Рис. 1. Схема основных энергетических донорных состояний в запрещенной зоне кремния, легированного примесью серы [2].

зоны проводимости. Индексы над химическим символом примеси обозначают зарядовое состояние, когда донорный уровень занят. Подстрочные индексы указывают на число атомов примеси, создающих донорный центр. Так S^0 и S^+ являются нейтральным и однократно ионизированным атомами серы, соответственно, которые занима-

ют узел в тетраэдрическом окружении в решетке кристалла, S^0_2 и S^+_2 - соответствующие зарядовые состояния пары атомов серы в кристалле. Обозначения $S_c(X_i)$ относятся к комплексам серы с числом атомов более трех. Информация о последних центрах довольно скучна [2].

В настоящей работе представлены результаты исследований влияния концентрации кремния в $Ge_{1-x}Si_x$ ($0 \leq x \leq 0.3$) на энергию верхнего донорного состояния серы, наблюданного в германии.

Локально гомогенные кристаллы $Ge_{1-x}Si_x$ с электронной проводимостью, обусловленной мелкой донорной примесью (Sb) с эффективной концентрацией 10^{13} - 10^{14} см⁻³, были получены методом выращивания из большого объема. Образцы размерами $(1\frac{1}{2}) \times (2\frac{1}{3}) \times (12\frac{1}{16})$ мм³, после соответствующей шлифовки и очистки поверхности, легировали примесью серы диффузионным методом через газовую фазу [4] при температурах 875-975°C. Время полного насыщения образцов при этих условиях составляло 300-400 часов. Для предотвращения газотранспортных явлений образцы находились в среде из порошкообразного кремния [2]. Закалка образцов после легирования серой производилась опусканием ампул в проточную воду. Энергия связи донорного состояния определялась на основе холловских измерений.

Во всех образцах с эффективной концентрацией сурьмы $2 \cdot 10^{13}$ - $5 \cdot 10^{14}$ см⁻³ до легирования серой концентрация свободных электронов (n) в интервале 77-300K сохранялась неизменной, что связано с полной ионизацией примеси сурьмы. После легирования серой тип проводимости образов остается электронным и в зависимости n от T проявляется глубокое донорное состояние примеси серы. Характерные температурные зависимости n от T для нескольких таких образцов различного состава представлены на рис. 2. В области низких температур неизменность концентрации свободных электронов связана с тем, что здесь электропроводность образцов обусловлена, в основном, полностью ионизированными мелкими прессыми центрами сурьмы. С повышением температуры начинается переход электронов с донорного состояния селена в зону проводимости и n начинает расти. Уравнение

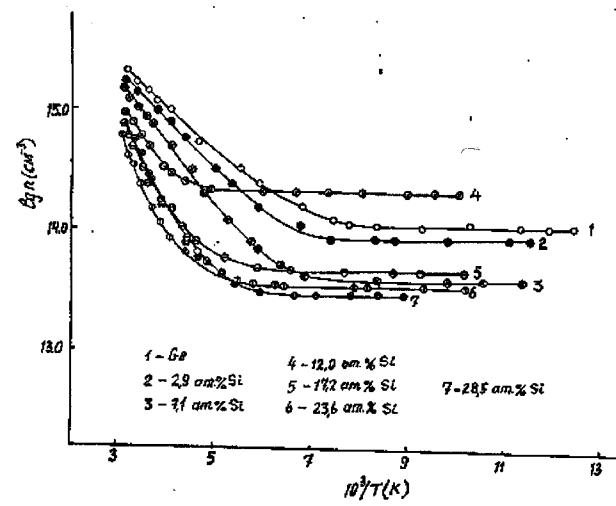


Рис.2. Температурные зависимости концентрации свободных электронов в электронных кристаллах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ легированных серой.

электрической нейтральности для рассматриваемого случая имеет вид [5]:

$$\frac{n^2 - N_{\text{sb}}n}{N_{\text{sb}} + N_S - n} = \frac{2(2 m_e^* kT/n^2)^{3/2}}{\gamma \exp(E/kT)} \quad (1)$$

Здесь E и γ - энергия связи и фактор вырождения донорного уровня серы; m_e^* - эффективная масса плотности состояний электронов в зоне проводимости; N_{sb} и N_S - концентрации примесей сурьмы и серы. Энергия связи верхнего донорного состояния серы (E) определялась путем подгонки методом наименьших квадратов теоретических расчетов по формуле (1) к экспериментальным данным. Для значений m_e^* в кристаллах различного состава использовались данные работы [6]. Фактор вырождения принимался равным двум [5]. Концентрация мелких шунтирующих доноров N_{sb} определялась по данным концентрации свободных электронов в области низких температур. На основе проведенных расчетов показано, что энергия связи верхнего донорного состояния серы в кристаллах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ изменяется линейно с составом как в германиеподобных, так и в кремниеподобных материа-

лах. Отметим, что к германиеподобным составам относятся твердые растворы с содержанием кремния до 15 ат.%, дно зоны проводимости, которых определяется минимумами в направлениях $|111|$, как и в германии. Составы с содержанием кремния более 15 ат.% называют кремниеподобными. Дно зоны проводимости в этих составах формируется минимумами в направлениях $|100|$, как в кремнии. Найденные зависимости E от состава $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ определяются следующими соотношениями:

$$E_x = E_c - (0.18 + 0.92x) \text{ эВ при } 0 \leq x \leq 0.15 \quad (2)$$

$$E_x = E_c - (0.29 + 0.05x) \text{ эВ при } 0.15 \leq x \leq 1 \quad (3)$$

Согласно уравнению (3), энергия связи верхнего донорного состояния серы в кремнии равна $E_c - 0.34$ эВ. Сравнение этой величины с данными для донорных уровней, обнаруженных в кремнии легированном серой, показывает ее достаточную близость к энергии первого донорного состояния замещающих атомов S в Si. Этот факт свидетельствует о связи экспериментально наблюдавшегося уровня $E_c - 0.18$ эВ в германии и в исследованных нами составах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ с первым донорным состоянием замещающих атомов серы в кристаллах. Перерасчет энергии исследованного донорного уровня S к вершине валентной зоны кристаллов, указывает на возможность описания линейного изменения E от x с помощью единого выражения:

$$E_x = E_c + (0.58 + 0.18x) \text{ эВ} \quad (4)$$

В уравнении (4) использованы данные работы [7] о скорости изменения ширины запрещенной зоны в $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ с составом.

Результаты исследований энергии связи верхнего донорного состояния серы в $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ приводят к следующему заключению. Глубокий донорный уровень, проявляющийся в электронных кристаллах $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ после легирования серой, относится к замещающим атомам этой примеси. К этому же центру относится донорное состояние $E_c + 0.18$ эВ в германии, легированном серой. Линейный характер изменения энергии связи донорного состояния примеси серы с составом $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ соответствует представлениям модели виртуального кристалла для твердых растворов.

- [1] А Милнес. В кн. "Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках", Москва, "Мир", 1977, с. 562.
- [2] E.Janzen, R. Stedman, G. Grossman, H.G. Grimmeiss. Phys. Rev. (B), 1984, v.29, №4, p.1907-1918.
- [3] В.И. Романенко. В кн. "Управление составом полупроводниковых кристаллов", Москва, "Металлургия", 1976, с. 368.
- [4] Г.Х. Аждаров. Докторская диссертация, Баку, 1981, с. 347.
- [5] Д. Блекмор В кн. "Статистика электронов в полупроводниках", Москва, "Мир", 1964, с. 392.
- [6] R.H. Parmenter. Phys. Rev., 1956, v.22, p.104-112.
- [7] S. Krishnamurthy, A. Sher and A.B. Chen. Phys. Rev., 1986, v. 33, p. 1026-1034.

H.X. Əjdərov, S.M. Bağırova, R.Z.Kazimzadə

DÜYÜNDƏ YERLƏŞMİŞ KÜKÜRD $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ AŞQARININ KRİSTALLARINDA DONOR SƏVIYYƏSİ

Məqalədə kükürd aşqarının $\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ kristallarında ($0 \leq x \leq 0.3$) yuxarı donor səviyyəsinin aktivləşmə enerjisi tədqiqinin nəticələri göstərilir. Aşqarın aktivləşmə enerjisi Holl ölçüləri əsasında tə'yin edilib. Göstərilib ki, tədqiq edilən səviyyənin enerjisi germaniuma və silisiumabənzər kristallarda tərkibdən xətti olaraq dəyişir və müvafiq olaraq $E_x = E_c - (0.18 + 0.92x)$ eV və $E_x = E_c - (0.29 + 0.05x)$ eV tənliklərlə ifadə olunur.

ДОНОРНОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАМЕЩАЮЩИХ АТОМОВ ПРИМЕСИ СЕРЫ В КРИСТАЛЛАХ $Ge_{1-x}Si_x$

Alınan nəticələrin analizi göstərir ki, elektronkeçirici və kükürd ilə aşqarlanmış kristallarda Holl ölçülərində özünü buruzə verən dərin donor səviyyəsi, düzündə yerləşmiş kükürd aşqarına aiddir.

G.Kh. Azhdarov, S.M. Bagirova, R.Z. Kyasimzade

DONOR STATE OF SUBSTITUTIONAL SULFUR IMPURITY IN $Ge_{1-x}Si_x$ CRYSTALS

The results of the upper donor state activation energy of sulfur impurity in $Ge_{1-x}Si_x$ crystals are given. Activation energy of the impurity was determined on the basis of the Hall measurements.

It is shown that the activation energy of the level varied linearly with composition in Germanium-and Silicon-like crystals and could be described correspondently by the relationships: $E_x = E_c - (0.18 + 0.92x)$ eV and $E_x = E_c - (0.29 + 0.05x)$ eV.

An analysis of the obtained data shows that the observed deep donor state in Sulfur-doped *n*-crystals is belong to the substitutional Sulfur impurity.

Дата поступления: 09.09.98

Редактор: М.И. Алиев